



Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

- + *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.
- + *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.
- + *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.
- + *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página <http://books.google.com>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

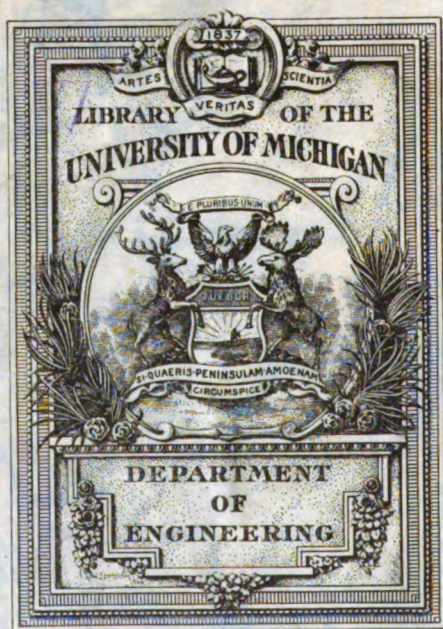
Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>

B 403804





~~BRITISH~~
LIBRARY

TK

2

A85

0



1897-1898

TOME IX

(2^e SÉRIE)

Bulletin

RÉDACTION

M. G. L'HOEST, rue Malibran, 85, Ixelles

Secrétaire Général.

ÉDITEURS

MM. GAUTHIER-VILLARS et fils

Quai des Grands-Augustins, 55

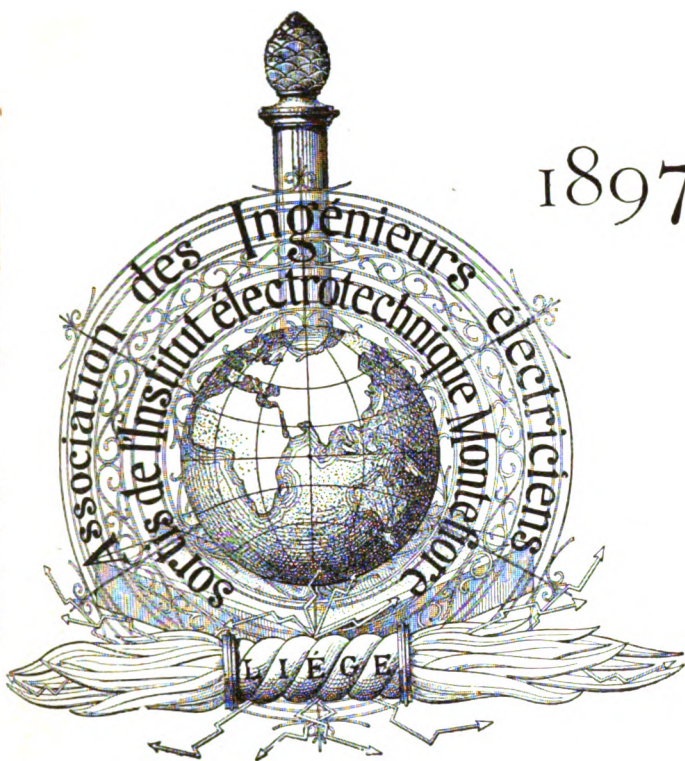
PARIS.

Imprimerie : LÉON DE THIEN
Boulevard de la Sauvenière, 10, Liège

Secrétaire administratif : M. MARÉCHAL, Paul, rue du Mambour, 17, Liège.

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin.

Abonnement annuel Fr. 20-»



1897-1898

TOME IX

(2^e SÉRIE)

Bulletin

RÉDACTION

M. G. L'HOEST, quai Mativa, 22, Liège
Secrétaire Général.

ÉDITEURS

MM. GAUTHIER-VILLARS et fils
Quai des Grands-Augustins, 55

PARIS.

Imprimerie : LÉON DE THIER
Boulevard de la Sauvenière, 10, Liège

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin.

Abonnement annuel Fr. 20-»

LISTE DES MEMBRES.

PRÉSIDENT D'HONNEUR :

M. le Sénateur George MONTEFIORE, fondateur de l'Institut Montefiore, rue de la Science, 35, Bruxelles.

VICE-PRÉSIDENT D'HONNEUR :

M. Eric GERARD, directeur de l'Institut Montefiore, rue Saint-Gilles, 43, Liège.

MEMBRES HONORAIRES :

MM. AYRTON, W. E., professeur au City and Guilds of London central Institution, Kensington, 41, Park Gardens, Londres W. (Grande-Bretagne);

BANNEUX, P. J., directeur d'administration des Télégraphes, Bruxelles ;

CORNU, M. A., membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École polytechnique, rue de Grenelle, 9, Paris (France) ;

DELARGE, Frédéric, Ingénieur en chef, directeur-général des Télégraphes (Hôtel des Télégraphes), Bruxelles ;

† FERRARIS, Galileo, professeur au Musée royal italien de l'industrie, Turin (Italie) ;

† HERTZ, Henri, professeur à l'Université de Bonn (Allemagne) ;

HOPKINSON, J., professeur au King's College de Londres, Victoria Street, 5, Westminster Chambers, Londres (Grande-Bretagne) ;

- LORD KELVIN of LARGS, professeur à l'Université de Glasgow (Grande-Bretagne);
- KITTLER, Erasmus, professeur à l'Institut électrotechnique de l'École technique supérieure de Darmstadt (Allemagne);
- MASCART, E. E. N., membre de l'Institut, professeur au Collège de France, Directeur du Bureau central météorologique, rue de l'Université, 176, Paris (France);
- POTIER, A., ingénieur en chef des mines, professeur à l'École polytechnique et à l'École des mines, membre de l'Institut, boulevard Saint-Michel, 89, Paris (France);
- ROITI, A., professeur à l'Institut royal des études supérieures, École de physique, via Gino Capponi, 3, Florence (Italie);
- ROUSSEAU, C., professeur à l'Université, rue Vautier, 30, Bruxelles;
- THOMSON, Elihu, professeur à Swampscott (Mass. États-Unis).

COMITÉ :

MM. DEL PROPOSTO, Césidio,	<i>Président.</i>
DAWSON, Philippe,	<i>Vice-Président.</i>
DE BAST, Omer,	<i>id.</i>
HENRARD, Georges,	<i>id.</i>
PESCETTO, Frédéric,	<i>id.</i>
L'HOEST, Gustave,	<i>Secrétaire-Général.</i>
LARMOYER, Georges,	<i>Trésorier.</i>
ANDRÉ, Henri,	<i>Commissaire.</i>
BAYET, Maurice,	<i>id.</i>
BRIFFAUX, Philippe,	<i>id.</i>

MM. COLARD, Oscar,	<i>Commissaire</i>
FRANCKEN, Edmond,	<i>id.</i>
MÉLOTTE, Félix,	<i>id.</i>
PIERARD, Emile,	<i>id.</i>
VAN KESTEREN, Charles,	<i>id.</i>
BAUDRY, Joseph,	<i>Secrétaire-adjoint.</i>
DELLA RICCIA, Angiolo,	<i>id.</i>
LEGUILLON, Henri,	<i>id.</i>
MICHEELS, Maurice,	<i>id.</i>
POLIVANOFF, Michel,	<i>id.</i>

ANCIENS PRÉSIDENTS :

MM. ZUNINI, Luigi,	(1887-1889)
LIBERT, Joseph,	(1889-1890)
DE WEYDLICH, Titus,	(1890-1891)
DEMAN, Léon,	(1891-1892)
DE BAST, Omer,	(1892-1893)
FRANCKEN, Edmond,	(1893-1894)
DE BAST, Omer,	(1894-1895)
MÉLOTTE, Félix,	(1895-1896)
DE BAST, Omer,	(1896-1897)

MEMBRES EFFECTIFS :

MM. AGUADO, Cayetano (électricien 1897), Principe, 13, Madrid (Espagne).

ALFIERI, Joseph, (officier d'artillerie, électricien 1896), ingénieur à la Société anonyme Electricité et Hydraulique, Charleroi.

ANDRÉ, Henri (A & M., 1895, électricien 1897) ingénieur, avenue de Saxe, 82, Lyon (Rhône, France).

ANDREWS, Léopold (électricien 1897), lieutenant au 8^e régiment d'artillerie, rue de la Trappe, 42, Herstal.

ANDRINGA, Alexandre (électricien 1891), capitaine commandant adjudant major du 8^e régiment d'artillerie, quai de Maestricht, 5, Liège.

ANTONIOTTI, Richard, (électricien 1897), lieutenant d'artillerie italienne, via Amedeo Avogadro, 22, Turin, (Italie).

ARENDT, Charles (mines 1883, électricien 1884), ingénieur, chaussée de Charleroi, 62, Bruxelles.

ASTFALCK, Alfred (électricien 1886), Ober-ingénieur der Elektrizitäts Actien Gesellschaft worm W. Lahmeyer et Cie (de Francfort a/M.), Friedrich-Wilhemstrasse, 4, Duisburg a/Rh. (Allemagne).

AUFORT, Albert, (1896), ingénieur civil, rue Rabelais, 40, Lyon, (Rhône-France).

BAERT, Adrien, (civil-électricien 1896) ingénieur à Delft (Hollande).

BAFFREY, Raymond (A. et M. électricien 1896), ingénieur, rue de Berne, 23, Paris (France).

BAILLY, Armand (méc. 1892, électricien 1896), ingénieur à la Société Cockerill, place Cockerill, 2, Seraing.

BAIVY, Edouard (électricien 1892), ingénieur, chef de réseau téléphonique, rue Lesbroussart, 75, Bruxelles.

BARDINI, Philippe (électricien 1895), ingénieur à l'Union Elektrizitäts Gesellschaft, Dorotheenstrasse, 43, Berlin (Allemagne).

BASQUIN, Jules (électricien 1895), ingénieur à la Société métallurgique, place de Louvain, 1, Bruxelles.

BAYET, Maurice (électricien 1888), ingénieur à la Compagnie industrielle d'accumulateurs électriques, place Saint-Pierre, 14, Liège

BÈDE, Philippe (électricien 1890), ingénieur directeur-

gérant de la Société anonyme « Force et Eclairage par l'Électricité », boulevard d'Anderlecht, 91, Bruxelles.

BERLOW, Michel (mécanicien, électricien 1897), ingénieur, Assistent für Maschinenbau am Polytechnicum, Riga (Russie).

BERTEMATI, Carlos (mines 1884, méc. et électricien 1886), directeur des mines de Cuatro Amigos, rue Larga, 59, Jerez de la Frontera (Espagne).

BERTHOLET, Armand (électricien 1897) ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, boulevard Audent, 97, Charleroi.

BERTOLINI, Jules (électricien 1889), lieutenant de la marine royale italienne, SS. Apostoli, sul canal Grande, Venise (Italie).

BESOSTRI, Piero (civil 1894, électricien 1895), ingénieur, Brera, 21, Milan (Italie).

BETOCCHI, Arthur (électricien 1896), ingénieur, rue du Concert, 14, Bruxelles.

BISKE, Michel (électricien 1895); ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue de l'Athénée, 7, Charleroi.

BOURQUIN, Jules (électricien 1890), ingénieur, secrétaire de la Direction des usines à gaz, rue de Condé, 5, Bordeaux (Gironde, France).

BOUVA, John (électricien 1894), ingénieur, rue de la Province, 20, Liège.

BRIFFAUX, Philippe (électricien 1896), capitaine du génie, rue Jonckeu, 34, Liège.

BROAD, Colin (électricien 1890), ingénieur, chef de section de la comissão da estrada de ferro Catalaô à Cuyaba, Caixa, 22, Santos (Brésil).

BRONNE, Georges (électricien 1893), ingénieur, rue d'Archis, 40, Liège.

BRONNE, Louis (électricien 1894), ingénieur, rue d'Archis, 40, Liège.

BRUNHES, Louis (électricien 1893), ingénieur à la Société Électrique du Nord, Roubaix (Nord, France).

BUNNIK, Herman (offic. de mar, électricien 1895), Villa Aurora, Maarssen, près d'Utrecht (Hollande).

BUSSET, Paul (électricien 1894), ingénieur aux Ormonts, Lausanne (Suisse).

CALDARERA, Évariste, (électricien 1897), ingénieur,

CALLET, George (civ. 1896, électricien 1897), ingénieur, Kloppehof, 22, Cologne (Allemagne).

CALMEAU, Léon (mines 1892, électricien 1894), ingénieur à Hollogne-aux-Pierres.

CALVÉ, Fernand (A. et M. 1892, électricien 1893), ingénieur, rue Boissière, 31, Paris (France).

CAMMEO, A. (P. et C., 1885-1890), ingénieur à la Società italiana pel Carbuco di Calcio, acetilène ed altri gas, piazza S. Silvestro, 92, Rome (Italie).

CASSA, Gerrit, Jacobus (électricien 1897), capitaine du génie de l'armée des Indes néerlandaises, Van Merlensstraat, 16, La Haye (Hollande).

CAVALIERI, Filippo (électricien 1896), ingénieur à l'Allgemeine Elektrische Berliner Gesellschaft, Gènes (Italie).

CAVALLI D'OLIVOLA, comte Camillo (civ. 1881, mines 1883, électricien 1884), ingénieur, via di Po, 30, Turin (Italie).

CECCACI, Pietro (électricien 1894), ingénieur, via Palestro, 18, Ancône (Italie).

CENTURIONE, marquis Carlo (civil 1885, électricien 1886), ingénieur, directeur de la Société A. E. G. Représentant général de l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft de Berlin, via S. S. Giacomo e Filippo, 19, Gènes (Italie).

CHANTRAINE, Alphonse (mines 1889, électricien 1888), ingénieur, chef de service aux usines de Hautmont (Nord, France).

CHAUDOIR, Maurice (électricien 1890), ingénieur, Directeur technique de la Société l'Électrique (accumulateurs Julien), rue Rubens, 67, Bruxelles.

CHEMIN-PALMA, Giovanni (civil 1893, électricien 1895), ingénieur, directeur technique de l'officine elettrotecnica nazionali, Fuori Porta Garibaldi, Pavia (Italie)

CHOULGUIN, Eugène (électricien 1896), ingénieur, rue de Marcinelle, 48, Charleroi

CICOGNA, Charles (électricien 1893), ingénieur, Directeur de la Compagnie Générale d'Électricité de la Ville, Calle Cuys, 763, Buenos-Ayres (Répub. Argent.)

CLERICI, Carlo (électricien 1894), ingénieur à la Société Generale italiana Edison di Elettricità, via Monforte, 48, Milan (Italie).

CLOSE, Ernest (mines 1884, électricien 1885), ingénieur des Télégraphes, rue Vondel, 62, Bruxelles,

COLARD, Oscar (électricien 1892), ingénieur des Télégraphes, rue du Châssis, 27, Bruxelles.

COLLIN, Emile (A. et M., électricien 1896), ingénieur, rue Béranger, 17, Le Havre (Seine-inférieure, France).

CONOR, Auguste (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur, sous-officier au 136^e régiment d'infanterie, 11^e compagnie, Saint Lô (Manche, France).

COOPS-BUSGERS, Édouard (électricien 1895), ingénieur, assistant aux cours de mécanique appliquée et de phy-

sique industrielle à l'Université, impasse Guillaume, 8 (Vennes), Liège.

COUARD, Jean (arts 1893, électricien 1895), contrôleur principal du service électrique des chemins de fer d'Orléans, en gare de Toulouse (Haute-Garonne, France).

CROMBÉ, Georges (civil 1893, électricien 1894), ingénieur à la Société générale de chemins de fer économiques, chaussée de Vleurgat, 16, Ixelles-Bruxelles.

CRUCIANI, Joseph (électricien 1889), ingénieur de la Société anonyme belge de Tramways, Rettefilo, 22, Naples (Italie).

CUCCURULLO, Gennaro (électricien 1895), ingénieur en chef au bureau de l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft, Bucharest (Roumanie).

DARDENNE, Henri (méc. 1892, électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, rue St-Josse, 3, Bruxelles.

DAWSON, Philip (P. et C. 1890, électricien 1891), ingénieur Victoria Street, 39, Westminster London S. W. (Grande-Bretagne).

DE AGUIAR D'ANDRADA, Edouard (électricien 1894), ingénieur.

DE BAST, Omer (électricien 1890), répétiteur à l'Institut Montefiore, rue César Franck, 16, Liège.

DEBAVELAERE, Julien-Alfred (civ. 1895, électricien 1897), ingénieur, Ledringhem (Nord, France).

DECROËS Joseph (électricien 1894), ingénieur, rue des Guillemins, 12, Liège.

DE ECHEVARRIA, Rafaël (A. et M. 1896, électricien 1897), ingénieur, plaza de la Estacion, 4, Bilbao (Espagne).

DE ERCORECA, Rufino (méc. 1888, électricien 1890),

ingénieur de la maison Armando Legorgen, Calle del Tiboli, Bilbao (Espagne).

DE GNOINSKI, Xavier (électricien 1895), ingénieur de la maison Siemens et Halske, rue Krolewska, 47, Varsovie (Pologne, Russie).

DE JONGE, Willem (méc. électricien 1891), ingénieur, Nieuwe Gracht, 34, Utrecht (Hollande).

DE KONING, Elisabertus (électricien 1896), ingénieur, Havenhade, 39, Scheveningen (Hollande).

DELEPAULLE, Hubert (électricien 1894), ingénieur à la Compagnie continentale du gaz, rue de France, 6, Bruxelles.

DELLA GIUSTA, Fausto (civ. électricien 1897), ingénieur, Martignacco (Udine, Italie).

DEL MONTE, Angelo (civ. électricien 1897) ingénieur, Steinfeldergasse, 28, Cologne, (Allemagne).

DEL PROPOSTO, Cesidio (officier du génie, électricien 1895), assistant à l'Institut Montefiore, rue St-Gilles, 31, à Liège.

DEL PUGLIA, Antonio, (électricien 1896), ingénieur,

DELTENRE, Louis (G. C. 1889, électricien 1895), ingénieur en chef de la Compagnie de Traction et d'Électricité, Sadovaïa, 59, Kb 15, St-Pétersbourg (Russie).

DEMANY, Ernest (électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, Hôtel des Postes, Bruxelles.

DEMANY, Léon (A. et M. 1878, électricien 1885), ingénieur de the Antwerp Téléphone and Electrical Works, avenue Quinten Metzys, 39, Anvers.

DEMARET, Léon (mines 1884, électricien 1885), ingénieur au corps des mines, place de Flandre, 17, Mons.

DE MEGLITZKY, Nicolas (électricien 1896), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, Charleroi.

DE MERONA, Xavier (1897), rue de Varenne, 24, Paris (France).

DERCLAYE, Oscar (mines 1892, électricien 1893), ingénieur honoraire des mines, directeur des travaux des charbonnages Oignies-Aiseau, Aiseau.

DE ROCHEMONT, Charles (électricien 1895), officier du génie, Ginneken, près Bréda (Hollande).

DE ROTE, Robert (électricien 1896), ingénieur des tramways électriques du Caire (Égypte).

DE RYCKERE, Georges (P. et C. 1890, électricien 1891), ingénieur en chef à la Compagnie internationale d'Électricité, quai de Coronmeuse, 28, Liège.

DE SAUTEIRON DE ST-CLÉMENT, Charles, (électricien 1897), capitaine d'artillerie de l'armée italienne, Arsenal de construction, Turin (Italie).

DESSAIN, Joseph (électricien 1896), ingénieur, rue Louvrex, 69^{bis}, Liège.

DETHIOUX, Joseph (mines 1891, électricien 1893), ingénieur des Télégraphes, Hôtel des Postes, Bruxelles.

DE WAAL, Wilhem (offic. de mar., électricien 1896), ingénieur à l'usine pour la fabrication des accumulateurs Tudor, Luisenstrasse, 31^a, Berlin N. W. (Allemagne).

DEWANDRE, Émile (mines 1891, électricien 1893), ingénieur à la Société anonyme Electricité et Hydraulique, boulevard Audent, 72, Charleroi.

DE WEYDLICH, Titus (P. et C., 1885, électricien 1888), ingénieur à Holubecze (station du chemin de fer sud-ouest de Russie : Kryjapol).

DE WOYCIECHOWSKI, Justinien (électricien 1895), ingénieur à la Compagnie Schuckert et Cie, Nuremberg (Allemagne).

D'HOOP, Ernest, (électricien 1893), ingénieur à la Société Les Tramways Bruxellois, rue de Hollande, 48, Bruxelles.

DIERMAN, William (électricien 1888), ingénieur-conseil, rue Saint-Léonard, 1, Liège.

DISCRY, Émile (mines 1889, électricien 1890), ingénieur au corps des mines, directeur gérant de la Société anonyme des charbonnages de Werister, à Fléron.

DONEDDU, Louis (électricien 1892), ingénieur,

DOPPLER, Henri (électricien 1897), lieutenant d'artillerie de l'armée néerlandaise, Muiden près d'Amsterdam, (Hollande).

DUBOIS, Alfred (électricien 1894), ingénieur, rue Wiertz, 14, Ixelles-Bruxelles.

DUCHESNE, Georges (mines 1895, électricien 1896), ingénieur, quai Marcellis, 8, à Liège.

DUEZ, Jules (méc. 1896, électricien 1897), ingénieur, Pêcherie, 38, Gand.

DURAND, José (électricien 1894), inspecteur des installations électriques dans la marine de guerre, Esmeralda, 22, Buénos-Aires (République Argentine).

DUTILLIEUX, Maurice (A. et M., G. C. et mines 1879, électricien 1894), ingénieur principal à la Compagnie générale de railways à voie étroite, square Ambiorix, 13, Bruxelles.

DU WELZ, Maurice (mines 1888, électricien 1889), directeur du service technique de la Société anonyme Électricité et Hydraulique, La Villette, 315, Charleroi.

ERENS, Fritz (méc. 1892, électricien 1894), ingénieur de la maison Siemens et Halske, Bahnabtheilung, Markgrafenstrasse, 94, Berlin (Allemagne).

EVERARTS, Alphonse (mines, électricien 1896), ingénieur de la Société métallurgique du Donetz-Iouriefka, Iouriefka (Gouvernement d'Ekatérinoslaw, Russie).

EXELBIRTH, Grégoire (électricien 1897) ingénieur, boulevard de la Sauvenière, 182, Liège.

FALKENBERG, Andréas (mécanicien 1893, électricien 1895), ingénieur, chef de service du tramway électrique, Bergen (Norwège).

FARMAN, Dick, (électricien 1891), ingénieur, rue Lafayette, 53, Paris (France).

FERON, Albert (électricien 1897), avenue de la Toison d'Or, 93, Bruxelles.

FERRAND, Alphonse (électricien 1894), ingénieur attaché au service du matériel et de la traction à la Compagnie P. L. M., rue Lacuée, 14, Paris (France).

FIRKET, Victor (mines 1891, électricien 1893), ingénieur au corps des mines, rue Fusch, 44, Liège.

FONTAINE, Félix, (électricien 1897), ingénieur, chez M. Fontaine, instituteur pensionné, Horion-Hozémont.

FONTAINE, Henry (électricien 1896), ingénieur, rue Van Artevelde, 49, Bruxelles.

FORESTI, Augusto (ind. 1896, élect. 1897), ingénieur,

FRANCKEN, Edmond (mines 1878, électricien 1891), ingénieur aux chemins de fer de l'État, quai de Fragnée, 19, Liège.

FRENAY, Henri (mines 1883, électricien 1884), ingénieur honoraire des Télégraphes, directeur de la Fabrique nationale d'armes de guerre, rue Laport, 3, Liège.

GARNIER, Victor (électricien 1886), ingénieur, Pine-rollo (Italie).

GERARD, Amédée (méc. 1896, électricien 1897), professeur, Verviers.

GÉRARD, Émile (mines 1883, électricien 1884), constructeur d'appareils de physique et de précision, quai d'Amercœur, 39, Liège.

GERLERI, César (électricien 1884), ingénieur à Pinerolo per Osasco, province de Turin (Italie).

GILLON, Paul (mines, électricien 1893), ingénieur des mines, avenue Rogier, 27, Liège.

GIUSTETTI, Humberto (électricien 1896), officier du génie, Brigade des télégraphistes, 3^e régiment du génie, Verona, Turin (Italie).

GOLDSCHMIDT, Henri-Paul (A. & M. 1893, électricien 1897), ingénieur, rue de Lisbonne, 33, Paris (France).

GRITTERS, Hendrik (électricien 1891), ingénieur, Speelmanstraat, 21, La Haye (Hollande).

GROSSMANN, Léon (mines 1894, électricien 1895), ingénieur,

GROTTENDIECK, Paul (électricien 1890, mécanicien 1891), ingénieur de la Société Électricité et Hydraulique, quai Fontanka, 127, log n° 6, St-Petersbourg (Russie).

HENRARD, Georges (électricien 1889), ingénieur en chef du service d'exploitation à la Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (Rhône, France).

HENRION, Albert (électricien 1896), lieutenant d'artillerie, rue de Joie, 32, Liège.

HERARD, Théodore (, électricien 1897), ingénieur, place Darcy, 2, Dijon (Côte d'Or, France).

HERDT, Louis (électricien 1894), ingénieur-conseil, rue Milton, 115, Montréal (Canada).

HERTZ, Wilhelm (électricien 1896), ingénieur de la maison Elektrycznósé, rue Krolewska, 27, Varsovie (Pologne, Russie).

HOROWITZ, Samuel, (électricien 1896), ingénieur, Elisawetinskaia, 9, Kiew (Russie).

HOURLCO, Nicolas (méc. 1891, électricien 1897), ingénieur à la Société du tramway de Moscou, Dolgoronkowskaia (Russie).

HUILLET, Antoine (électricien 1896), ingénieur au service électrique des usines du Creusot, rue St-Éloi, 5, Le Creusot (Saône et Loire, France).

ILKOFF, Urdan (électricien 1896), ingénieur électricien des Télégraphes et Téléphones de Bulgarie, Sophia (Bulgarie).

JACQUES, Julien (électricien 1896), lieutenant d'artillerie, répétiteur à l'École militaire, avenue de la Couronne, 153, Bruxelles.

JANSSEN, Alfred (mines 1889, électricien 1890), ingénieur à la Société anonyme liégeoise d'Électricité, rue Lambert-le-Bègue, 36, Liège.

JAVAL, Jean (électricien 1894), ingénieur, boulevard La Tour Maubourg, 5, Paris (France).

JONA, Emmanuel (électricien 1885), ingénieur en chef à la manufacture de câbles Pirelli et C^e, Milan (Italie).

JOVIGNOT, Charles (A. & M., électricien 1897), ingénieur à la Société industrielle des Moteurs électriques et à vapeur, rue André-Gill, 4, Paris (France).

JULIUS, Charles-Henri (électricien 1894), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, avenue Gillieaux, 2, Charleroi.

JULLIEN, Georges (électricien 1897), ingénieur, place Paul Bert, 3, St-Étienne (Loire, France).

KEIFFENHEIM, Hugo (électricien 1891), ingénieur, Fernwood road, Newcastle on Tyne (Angleterre).

KNIPHORST, Gerrit-Jean (électricien 1897), lieutenant de la marine néerlandaise, Balistraat, 28, La Haye (Hollande).

KOENIGSBERG, Isidore (électricien 1895), ingénieur,

KROOL, Léon (méc. 1896, électricien 1897), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, boulevard Audent, 21, Charleroi.

LAMBERT, Alphonse (électricien 1893), ingénieur honoraire des ponts et chaussées, ingénieur des constructions navales, ingénieur des Télégraphes, avenue des Fleurs, 170, Uccle, lez-Bruxelles.

LARMOYER, Georges (électricien 1888), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue Dagnelies, 14, Charleroi.

LATMIRAL, Joseph (électricien 1897), ingénieur à la Société Siemens et Halske, Charlottenstrasse, 81, Berlin (Allemagne).

LECHAT, Carl (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, à la Société Les Tramways Bruxellois, avenue Louise 325, Bruxelles.

LECHAT, Paul (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, avenue d'Avroy, 57, Liège.

LEMAIRE, Léon (mines 1887, électricien 1888), ingénieur à la maison Ghislain, rue des Armuriers, 11, Liège.

L'HOEST, Gustave (mines 1874, électricien 1888), ingénieur principal aux Chemins de fer de l'État, quai Mativa, 22, Liège.

LIBERT, Joseph (mines 1874, électricien 1884), ingénieur en chef, directeur des Mines, rue Mathieu, 9, Namur.

LIMAUGE, Eugène (civ. 1893, électricien 1897), ingénieur, rue de Luxembourg, 22, Bruxelles.

LINDER, Léo (électricien 1896), ingénieur à la Général Électric C^o, Schenectady near Albany, post office, (New-York, U. S. A.).

LOEWENSTEIN, Alfred (mines 1891, électricien 1893), ingénieur, rue de Courcelles, 45, Paris (France).

LUDERGNANI, Ferruccio (électricien 1889), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue du Parc, 11, Charleroi.

MAGENTIES, Louis (électricien 1894), ingénieur, rue de l'Arbre Sec, 13, Lyon (Rhône, France).

MALASPINA, marquis Torquato (civil 1894, électricien 1895).

MANZI, Julio (électricien 1892), ingénieur, Civita Vecchia (Italie).

MARKOVITCH, Grégoire (mécanicien, électricien 1896), ingénieur,

MARKOVITCH, Stefan (1895), docteur en sciences physiques de Vienne, professeur à la Faculté technique, Markova uliza, 5, Belgrade (Serbie).

MARTIN, Gaston (électricien 1896), ingénieur, rue Deville, 3, Toulouse (Haute-Garonne, France).

MARTIN, Joseph (électricien 1897), ingénieur à la Société de traction électrique, Hôtel de Belle-Vue, La Bassée (Nord-France).

MASSANGE, Maurice, (mines, électricien 1896), ingénieur, rue de la Presse 14, Bruxelles.

MASSON, Émile (mines 1884, électricien 1885), ingénieur honoraire au corps des mines, professeur à l'École supérieure des textiles, avenue Peltzer, 21, Verviers.

MATHIEU, Émile (électricien 1896), sous-lieutenant à la Compagnie d'ouvriers du génie belge, Anvers.

MAUS, Benjamin (const. civ. électricien 1897), ingénieur des Télégraphes, rue de la Limite, 74, Bruxelles.

MAVROÏDIS, Georges (électricien 1896), ingénieur aux ateliers Jaspar, rue de la Régence, 47, Liège.

MÉLOTTE, Félix (mines 1887, électricien 1888), ingénieur, directeur technique des ateliers Jaspar, rue du Parc, 43, Liège.

MICHAUX, Camille (électricien 1894), ingénieur, directeur technique de la Société française de l'Accumulateur Tudor, rue de l'Hotel-de-Ville, 106, Lyon (Rhône, France).

MINSIER, Camille (mines 1873, électricien 1885), ingénieur en chef, directeur des mines, rue Baslé, 20, Charleroi.

NAGELMACKERS, Gaston (A & M. 1891, électricien 1892), ingénieur à la Société des Forges et Tôleries liégeoises, rue de Liège, 83, Jupille.

NAGTGLAS-VERSTEEG, Cornelis, Dirk (électricien 1891), ingénieur, directeur technique de l'agence électro-technique de la Société anonyme Electricité et Hydraulique de Charleroi, Heerengracht, 115, Amsterdam (Hollande).

NAMBA, Massashi (1897), 4, Melcombe Place, Dorset square, Londres N. W. (Grande-Bretagne).

NAVARRO-VIOLA, Jorge (électricien 1893), ingénieur à la ville de Buenos-Aires, Maipù, 40 (République Argentine).

NICODÈME, Paul (méc. 1889, électricien 1895), ingénieur de la maison de Dietrich et C^{ie}, villa Mon Rêve, Niederbronn (Alsace).

NICOLINI, Eugénio (méc. 1896, électricien 1897), ingénieur à l'Union Elektricitäts Gesellschaft, Eschweiler-Pumpe bei Aachen (Allemagne).

NIEUWLAND, Pierre (électricien 1894), ingénieur, attaché au Ministère de l'Industrie et du Travail, rue Franklin, 49, Bruxelles.

NOBILI, Dino (électricien 1894), lieutenant du génie, professeur à l'École d'application d'artillerie et du génie, Turin (Italie).

NOË, Francesco (électricien 1892), ingénieur mécanicien, Casa Dassi, Pavie (Italie).

NOIRFALISE, Léon (A. et M. 1891, électricien 1892), ingénieur, secrétaire de la Société générale d'entreprise de travaux, directeur du chemin de fer vicinal d'Ans-Oreye, quai de la Boverie, 6, Liège.

NORSTRAND, Albert (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur chef de l'usine d'électricité de Bergen (Norwège).

NOTHOMB, Gérard (mines 1895, électricien 1896), ingénieur,

NOWINSKI, Joseph, (1886), ingénieur à l'usine électrique (ingénieur I. Margulis), rue Langeron, Odessa. (Russie).

NUZZACI, Bonaventura (ind. 1895, électricien 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

NYSENS, Paul (électricien 1894), ingénieur, rue de la Loi, 153, Bruxelles.

ORBAN, Charles (méc. 1889, électricien 1890), ingénieur, directeur de l'usine du secteur des Champs-Élysées, boulevard Victor Hugo, 98, Neuilly s/Seine, lez-Paris, (France).

PEDRIALI, Giuseppe (électricien 1892), ingénieur à la Société anonyme Les Tramways bruxellois, place Bara, 8, Bruxelles.

PEETERS, François (électricien 1896), ingénieur chez M. Fourmanois, Haine-Saint-Pierre.

PELTZER, Alfred (méc. 1890, électricien 1897), ingénieur à l'Union Elektricitäts Gesellschaft, La Louvière.

PEREGRINI, Jean (civil 1894, électricien 1895), ingénieur,

PERUSSET, Gustave (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur, villa Laurence, 1, Lausanne (Suisse).

PESCETTO, Frédéric (électricien 1887), lieutenant-colonel du génie, commandant la brigade des Ferrovieri, Turin (Italie).

PHILIPPE, Georges (électricien 1894), ingénieur adjoint à l'Inspection générale de la Compagnie du chemin de fer du Nord-Belge, rue de la Limite, 1, Liège.

PICARD, Georges (électricien 1889), directeur technique de la Société anonyme des papeteries (ancienne maison Olin et fils), Virginal.

PICAZO, Léopold (électricien 1890), ingénieur, rue San Raphaël, 66, San Fernando (Espagne).

PIEDBOEUF, Louis (A. & M. 1895, électricien 1896), ingénieur à la Société Cockerill, rue St^e-Marie, 13, Liège.

PIERARD, Emile (mines 1886, électricien 1887), ingénieur des Télégraphes, rue des Rentiers, 92, Etterbeek-Bruxelles.

PIERRON, Paul (chimiste-électricien 1896), ingénieur, rue Salla, 4, Lyon (Rhône, France).

PIO, Césaire (officier, électricien 1896),

PIRARD, Albert (offic. d'artillerie, électricien 1897), ingénieur à la Société générale d'entreprise de travaux, rue Wazon, 56, Liège.

PIRARD, Léon (électricien 1897), ingénieur, Souverain-Wandre, lez-Liège.

PLANAS Y ESCUBOS, Juan (électricien 1894), ingénieur à la Société Planas, Floquer y C^a, Ronda de la Universidad, 22, Barcelone (Espagne).

POENARU, Dimitri (électricien 1894), ingénieur chef de section au ministère des travaux publics, Strada Clopotarii, 10, Bucharest (Roumanie).

POLAIN, Auguste (méc. 1896, électricien 1897), ingénieur aux forges et aciéries du Nord et de l'Est, rue S^t Gery, 33, Valenciennes (Nord, France).

POLYSU, Constantin (électricien 1894), ingénieur à l'atelier central des chemins de fer roumains, Strada Caloni-frescu, 9, Bucharest (Roumanie).

QUINAUX, Ernest, lieutenant-colonel d'artillerie, Inspecteur des armes de guerre, rue Nagelmackers, 10, Liège.

RANSY, Auguste (mines 1879, électricien 1884), ingénieur, cour des Minimes, 11, Liège.

RAZU, Aristide, (officier du génie, électricien 1895), Strada Sculpturei, 29, Bucharest (Roumanie).

RENARD, Lucien (électricien 1895), ingénieur, chef du service technique de la Société anonyme d'électricité (Bouckaert et C^{ie}) rue de Laeken, 82, Bruxelles.

RENSONNET, Alfred (électricien 1896), ingénieur à la Compagnie Helios, Cologne Ehrenfeld (Allemagne).

REVEL, Francesco (électricien 1894), capitaine d'artillerie, Poudrerie de Fontana-Liri (Italie).

RHONE, Jean (électricien 1896), ingénieur, rue du Pré-aux Clers, 10, Paris (France).

RIBONI, Pietro (électricien 1896), ingénieur au corps des mines italien, via Vittoria, 53, Milan (Italie).

RIZZO, Guguelmo (électricien 1896), ingénieur à la station du Tram électrique de Ixelles-Boendael, avenue de l'Hippodrome, 170, Bruxelles.

ROBERT, Léon (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur, rue de la Liberté, 24, Liège.

ROBERT, Paul (mines 1895, électricien 1896), ingénieur aux Chemins de fer de l'État, rue de Livourne, 43, Bruxelles.

ROOSEN, Alfred (mines 1885, électricien 1886), ingénieur des Télégraphes, rue Vondel, 64, Bruxelles.

ROSENFELD, Léon (électricien 1896), ingénieur, Krestchatik, 10, Kiew (Russie).

ROUSSEAU, Auguste (électricien 1895), lieutenant du génie, adjoint au commandant du génie de Liège (rive droite), Pixhos, Parfondvaux, Saive-Wandre.

RUEMPOL, Everhard (officier du génie, électricien 1893), Berg en Dalsche weg, 20, Nimègue (Hollande).

RUTTEN, Arthur (électricien 1892), ingénieur aux ateliers de construction A. et H. Rutten, rue Bois le Duc, 60, Maestricht (Hollande).

SANTARELLI, Giorgio (P. et C. 1887, électricien 1888), constructeur d'appareils de précision, via Giotto, 2^{bis}, Florence (Italie).

SAROLÉA, Jean (P. et C. 1888, électricien 1894), ingénieur à la Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (Rhône, France).

SARRAT, Frédéric (électricien 1896), ingénieur, soldat au 18^e Escadron du Train des Equipages Militaires, 5^e Compagnie, Bordeaux, La Bastide (Gironde, France).

SCANDIANI, Angelo (civil 1894, électricien 1895), ingénieur à la Société générale Italiana Edison di Elettricità, via Tommaso Grossi, 2, Milan (Italie).

SCARAMANGA, Pantaléon (méc. 1890, électricien 1891), ingénieur à Bakhmout, gouvernement d'Ekatérinoslaw (Russie)

SCHEFFER, Jean (électricien 1894), ingénieur-mécanicien, Diergaardelaan, 25, Rotterdam (Hollande).

SCHIFFERS, Henri (méc. 1894, électricien 1895), ingénieur, rue de Bruxelles, 67, Verviers.

SCHOEFFER, Louis (électricien 1896), ingénieur, place de Meir, 54, Anvers.

SCHREIBMANN, Frédéric (électricien 1895), ingénieur

SÉE, Armand (électricien 1892), associé de la maison Edmond et Armand Sée, ingénieurs (étude et construction de bâtiments industriels; installations d'usines), rue d'Amiens, 15, Lille (Nord, France).

SEGRE, Ettore (méc. 1896, électricien 1897), ingénieur chez MM. Eredi Norsa, via Monte Napoleone, 22, Milan, (Italie).

SEGRE, Vito (électricien 1886), ingénieur, inspecteur technique de la Société royale d'assurances, Corso de Umberto, 42, Turin (Italie).

SEMENZA, Guido (électricien 1894), ingénieur à la Società Generale Italiana Edison di Elettricità, via Fatebenefratelli, 21, Milan (Italie).

SERRA DE CASSANO, Louis (électricien 1893), ingénieur à la Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston, rue de Londres, 27, Paris (France).

SOMACH, Henri (méc. 1895, électricien 1896), ingénieur à la Compagnie française pour l'exploitation des procédés Thomson-Houston, rue de Londres, 27, Paris (France).

STEELS, Oscar (P. & C. 1893, électricien 1894), ingénieur des Télégraphes, Destelbergen, lez-Gand.

SWIEGINSKI, Michel (méc. , électricien 1897), ingénieur,

TASTÉ, Albert (mines 1889, électricien 1892), ingénieur à Verviers.

TCHERNIAK, Tcemah (méc. , électricien 1897), ingénieur, Kontora Kreines, Warvarka, Moscou (Russie).

THEUNIS, Georges (électricien 1897), sous-lieutenant d'artillerie, rue Marie-Thérèse, 52, Bruxelles.

TURCHI, Carlo (P. & C. — électricien 1896), ingénieur, via Giovecca, 89, Ferrara (Italie).

VALDUGA, Ugo (électricien 1897), ingénieur, Feltre (Italie).

VAN AARDENNE, Jean (méc. 1894, électricien 1894), ingénieur chez MM. Penn et Bauduin, Spuiweg, 41, Dordrecht (Hollande).

VAN ASPEREN, Corneille, (offic de mar., électricien 1897), Blankenberg straat, La Haye (Hollande).

VAN DER GOOT, Fiepkö (électricien 1891), ingénieur, chef du service électrique des signaux et des télégraphes à la C^{ie} néerlandaise des Chemins de fer de l'Afrique du Sud, Bus, 302, Prétoria (Transvaal).

VAN DER HECHT, Léon-Henri (civ., électricien 1897), ingénieur, rue de Moresnet, 1, Liège.

VAN DER WALLEN DE FERNIG, Guillaume (P. & C. 1894, électricien 1896), ingénieur à la Société Cockerill, rue André-Dumont, 19, Liège.

VAN DOOREN, François (A. et M. 1892, électricien 1897), ingénieur à la Société anonyme du chemin de fer à voie étroite Bruxelles à Ixelles-Boendael, rue Lonny, 7, Ixelles.

VAN KESTEREN, Charles (mines 1894, électricien 1895), ingénieur, sous-directeur à la Société anonyme pour la fabrication des cartouches et projectiles d'Anderlecht, boulevard de la Révision, 14, Bruxelles.

VAN MUSSCHENBROEK, Pieter (off. de mar., électricien

1897), ingénieur chez M. Jardans, Eschweiler Aue, bei Aachen (Allemagne).

VAN PREHN, Wilhem (électricien 1892), ingénieur, Herderinnestraat, 9A, La Haye (Hollande).

VAN RIJN, Cornelis (offic. de mar., électricien 1897), Aelbrechtskalk, 77, Rotterdam (Hollande).

VAN VLOTEN, Paul (mines 1884, électricien 1885), ingénieur, avenue Louise, 391, Bruxelles.

VENEZIAN, Émile (industriel 1886, électricien 1895), ingénieur au ministère de l'industrie et du commerce, via Stanperia, Rome (Italie).

VERDELEANU, Léon (méc. 1892, électricien 1893), ingénieur à l'Usine électrique de l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft de Berlin, strada Unirei, 128, Craïova (Roumanie).

VER ECKE, Abel (électricien 1894), lieutenant du génie, compagnie des télégraphistes de place et artificiers, Anvers.

VISCIDI, Pasquale (civil 1896, électricien 1897), ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, Charleroi.

VITALE, Maurizio (électricien 1894), ingénieur à la Societa generale italiana Edison di elettricità, via Tommaso Grossi, 2, Milan (Italie).

VOÏNAROWSKI, Paul (électricien 1895), ingénieur des Télégraphes, professeur à l'Institut électrotechnique de Saint-Pétersbourg (Russie).

VON BOSCHAN, Arthur (P. & C., 1881, électricien 1890), ingénieur au « Kaiser Ferdinand Nordbahn » Burgring, 1, Vienne (Autriche).

VON HAHN, Karel (électricien 1893), ingénieur, I, Jernfaltstrasse, 7, Vienne (Autriche).

WALCH, Eugène (électricien 1897), ingénieur de la Société l'Eclairage électrique, avenue de Ségur, 42, Paris (France).

WEKER, Ladislav (méc., électricien 1897), ingénieur,

WERY, Émile (mines 1893, électricien 1894), ingénieur aux charbonnages d'Abhooz et Bonne-Foi-Hareng, Herstal.

WIGNY, Paul (mines 1895, électricien 1896), ingénieur, rue de la Halle, 23, Liège.

WILMET, Henri (électricien 1897), lieutenant d'artillerie, fort de Loncin.

WINSLOW, George-Herbert (électricien 1888), consulting-electrical Engineer, Lewis Building, 6 th, avenue et Smithfieldst. Pittsburg, Penna, U. S. A.

WODOPIANOFF, Jean (méc. 1890, électricien 1895), ingénieur à l'usine des locomotives Newsky, chaussée de Schlisselbourg, 1-8, St-Petersbourg (Russie).

ZELENAY, Constantin (électricien 1895), ingénieur à la Société en commandite Duflon, Constantinovitch et C^{ie}, ile des Apothicaires, rue Lapouchinskaïa, 8, Saint-Petersbourg (Russie).

ZUNINI, Luigi (électricien 1884), professeur à l'Institut royal technique supérieur, Foro Bonaparte, 49, Milan (Italie).

MEMBRES ASSOCIÉS :

MM. BOULVIN, Roch (mines 1881), ingénieur des Télégraphes, rue de la Croix de Fer, 35, Bruxelles.

CABELLA, Bartolomeo, directeur de la Tecnomasio, Milan (Italie).

CLEMENCIN (lieutenant d'artillerie), ingénieur à la

Société lyonnaise des Forces motrices du Rhône, rue de la République, 37, Lyon (Rhône, France).

CLOEREN, Henri, ingénieur à l'Institut polytechnique, Junker Strasse, 35, Aix-la-Chapelle (Allemagne).

DEBACHY, Charles, répétiteur à l'École provinciale des mines du Hainaut, Mons.

DE CAZENAVE, Clément, ingénieur, administrateur-délégué de the Antwerp Telephone and Electrical Works, boulevard Léopold, 13. Anvers.

DULAIT, Julien (mines 1878), administrateur-gérant de la Société anonyme Électricité et Hydraulique, rue Prunier, 1, Charleroi.

HANAPPE, Saturnin, professeur à l'École provinciale des mines du Hainaut, La Hestre.

HEN, Léon (ex-officier du génie), fabricant de câbles électriques, rue de la Concorde, 33, Bruxelles.

LEBRUN, Bruno, Ateliers de construction de Nimy-Mons.

MACQUET, Auguste (mines 1876), ingénieur au Corps des mines, directeur de l'École des mines, boulevard Dolez, 22, Mons.

MALENGRET, Achille, ingénieur du service de l'Électricité de la ville, rue Melsens, 18, Bruxelles.

MANNE, Jacques (mines 1871), directeur-gérant de la Société anonyme des fonderies et tréfileries de bronze phosphoreux d'Anderlecht, rue du Bronze, 8, Anderlecht-Bruxelles.

PASQUALINI, Louis, professeur, ingénieur électricien, via Colombo, 5, Spezia (Italie).

PIEPER, Henri (fils), administrateur délégué de la Compagnie internationale d'Électricité, rue des Bayards, 20, Liège.

PROCTOR FARADAY, C., ingénieur électricien, chargé de la fabrication des instruments et montures électriques à la Edison Swan United Electric Light C^o L^d, Chertsey Cottage, Southbury road, Enfield, Middlesex (Angleterre).

VAN DEN KERCKHOVE, Armand, ingénieur, rue de la Loi, Bruxelles.

WEILER, Max, ingénieur à la Société anonyme Électricité et Hydraulique, Charleroi.

WEINMAN, industriel, rue Stephenson, 10, Bruxelles.

MEMBRES TEMPORAIRES.

ANDOUCHE, Camille (méc. 1897), ingénieur, rue Villette, 19, Liège.

ARAGON, Casimir (A. & M. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BALESTE, Léon (A. & M. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BARDIAUX, Georges (méc. 1897), ingénieur, rue Ferdinand Henaux, 7, Liège.

BATIGNE, Laurent (A. & M. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BAUDELET, Émile, lieutenant d'artillerie, rue Thier-de-la-Fontaine, 34, Liège.

BAUDRY, Joseph, capitaine du génie, rue de Campine, 91, Liège.

BEDORET, Henry (mines), ingénieur, rue du Jardin Botanique, 12, Liège.

BERGER, Richard (mines 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BISACCO-POLOZZI, Jacques, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BODDE, Théodore, officier de marine des Indes néerlandaises, rue Fabry, 20, Liège.

BONIFACE, Émile, rue de la Cathédrale, 24, Liège.

BORRENS, Émile (méc. 1897), ingénieur, rue Hocheporte, 84, Liège

BOUBNOFF, Léonce, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

BOULANGER, Albert, ingénieur, rue Duvivier, 7, Liège.

BRANDENBURG, Edwin, rue de la Paix, 6, Liège.

BROOKS, Fernand, rue Chaussée-des-Prés. 54, Liège.

CENTONZE, Angelo, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

CHEFTEL, Joseph (const. 1896), ingénieur, rue de la Paix, 38, Liège.

COMPIJN, Victor, capitaine du génie, rue Hemricourt, 23, Liège.

CONS, Georges, ingénieur, rue de la Régence, 29, Liège.

CORTIVO, Aurelio, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

COUSIN, Élie (A. & M.), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

CRUDENAIRE, Fernand, ingénieur, rue André-Dumont, 31, Liège.

DALEMONT, Julien, boulevard de la Constitution, 117, Liège.

DE GRIMOUARD, Jacques (mines 1895), boulevard de la Sauvenière, 146, Liège

DELLA RICCIA, Angiolo, lieutenant du génie italien, rue du Mouton-Blanc, 17, Liège.

DELMA, Dominique, rue Hocheporte, 84, Liège.

DELORI, Jean, rue Grétry, 13, Liège.

DE METZ, Paul, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

DE MEEUS, Édouard, rue du Vert-Bois, 25, Liège.

DENDONCKER, Auguste, rue de l'Université, 19, Liège.

DE NONANCOURT, Frantz (méc. 1897), ingénieur, rue des Dominicains, 15, Liège.

DUBELTOWIRENZ, Henry, rue Robertson, 5, Liège.

FEYS, Louis (mines 1897), ingénieur, boulevard de la Sauvenière, 114, Liège.

FOUCAULT, Charles (A. & M. 1895), ingénieur, rue de l'Université, 12, Liège.

FRIDERICHs, Joan, officier de la marine hollandaise, place Saint-Pierre, 11, Liège.

GIELEN, Louis (méc. 1897), ingénieur, rue du Pot-d'Or, 51, Liège.

GRANNUZZI, Julio, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

GREINER, Léon, élève-ingénieur, Seraing.

GUILLEAUME, Charles (A & M. 1897), ingénieur, quai Saint-Léonard, 14, Liège.

GUY, Georges, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

HACHEZ, Gaston (mines 1897), ingénieur aux chemins de fer de l'État, rue des Angès, 23, Liège.

HAINAUT, Stéphane (mines 1897), ingénieur, rue de Pitteurs, 41, Liège.

HALLER, Henry, rue Mont-Saint-Martin, 4, Liège.

HENRION, Marcel (mines 1897), ingénieur, Jupille.

HERZEN, Hugo (méc. 1897), ingénieur, rue Monulphe, 53, Liège.

HOOGHWINKEL, Gérard, place Saint-Pierre, 11, Liège,

IABOUKOFF, Alexis (méc. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

IVANOFF, Nicolas (méc. 1895), ingénieur, rue Tête-de-Bœuf, 14, Liège.

JADOT, Lambert (C.-C. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

LEGUILLON, Henri (A. & M. 1895), ingénieur, rue Bassenge, 28, Liège.

LE BRUN, Victor (civ. 1897), ingénieur, rue Lesbroussart, 80, Bruxelles.

LIPPENS, Raymond (chim. 1897), ingénieur, rue Monulphe, 1, Liège.

LOPATINE, Ismaël (méc. 1897), ingénieur, rue Saint-Remy, 11, Liège.

LUC, Achille, rue Duvivier, 7, Liège.

LURASCHI, Armide, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

MANZONI, Dominique (ind. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

MARCHAL, Léon, lieutenant du génie, rue Ferdinand Héniaux, 7, Liège.

MARCHAND, Albert (arts 1898), ingénieur, rue Hors-Chateau, 58, Liège.

MARI, Washington, rue Carlier, 22, Liège.

MARTIN, Gabriel (arts). ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

MATERNOWSKI, Tulus, rue Grétry, 107, Liège.

MICHA, Émile, rue Louvrex, 73^{bis}, Liège.

MICHEELS, Maurice, officier d'artillerie, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

MODIGLIANI, Umberto, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

MOENS, Albert (mines 1897), ingénieur, rue Raikem, 8, Liège.

MUGICA, Justino, rue Duvivier, 12, Liège.

MUTH, Fritz (méc. 1897), ingénieur, rue Éracle, 13, Liège.

NERING-BÖGEL, Jean (méc. 1897), ingénieur, rue Méan, 16, Liège.

NEUJEAN, Paul, boulevard Frère-Orban, 8, Liège.

OTTAVI, Ludovic (civ. 1897), ingénieur, rue Sur-la-Fontaine, 56, Liège.

PACKARD, Franck, ingénieur, rue Saint-Gilles, 51, Liège.

PAQUOT, Albert (A. & M. 1897) ingénieur, rue Courtois, 8, Liège.

PASSET, Claude (A. & M.), ingénieur, rue des Augustins, 1, Liège.

PECHER, Victor, boulevard de la Sauvenière, 38, Liège.

PELLEGRIN, Lucien, officier d'artillerie, rue Maghin, 55, Liège.

POGGI, Ettore, rue de la Syrène, 7, Liège.

POLIVANOFF, Michel (méc. 1897), ingénieur, rue Monulphe, 1, Liège

RAUDOT, Albert, ingénieur, rue Monulphe, 1, Liège.

RIBONI, Carlo (civ. 1895), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

ROLAND, Albert, rue Saint-Gilles, 51, Liège.

ROUSSAKOFF, Serge (méc. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 52, Liège.

SCHIESARI, Baccio (civ. 1896), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

SCHMIDT, Louis, rue Grétry, 159, Liège. .

SCHOPOFF, G., rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

SEMET, Victor (méc. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 51, Liège.

SOMERHAUSEN, Georges (const 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 51, Liège.

SPERK, Bernard (méc. 1897), ingénieur, rue Saint-Gilles, 31 (Institut Montefiore), Liège.

TART, Paul, rue Vinâve-d'Ile, 1, Liège.

TIDEMAND, Adolphe, place de la Cathédrale, 5, Liège.

VANDECAPELLE, Albert (arts 1882), ingénieur, avenue de l'Observatoire, 60, Liège.

VAN DEN ENDT, François (A. & M. 1897), ingénieur, rue de la Charité, 59, Bruxelles.

VAN DEN SAVEL Paul (mines 1897), ingénieur, Montegnée

VAN DIEVOET, Georges, rue du Jardin Botanique, 12, Liège.

VAN TURENHOUT, Jules, rue Paradis, 108, Liège.

WEINSTOCK, Waldemar (méc. 1897), ingénieur, rue Mont-Saint-Martin, 24, Liège.

WILKIN, Gustave (méc. 1893), ingénieur, rue Pont-Thomas, 3, Liège.

ZOCCHI, Alexandre, lieutenant d'artillerie, rue des Guillemins, 9, Liège.

SÉANCE DU 28 NOVEMBRE 1897.



Ont signé la liste de présence : MM. Andrews, Aragon, Baleste, Batigne, Bayet, Bodde, Boniface, Briffaux, Callet, Coops-Busgers, Cousin, De Bast, Della Riccia, Del Monte, Del Proposto, de Metz, Feron, Friderichs, Foucault, Gerard Eric, Herzen, Hooghwinkel, Ivanoff, Larmoyer, Melotte, Moens, Mugica, Muth, Noirfalise, Passet, Polivanoff, Riboni, Robert P., Roland, Roussakoff, Tart, Vandecapelle, Van der Hecht, Van der Wallen, Wilkin, Zocchi.

M. Eric Gerard, vice-président d'honneur, au fauteuil.

M. Del Proposto, président, notifie à l'Assemblée que M. L'Hoest, secrétaire général, retenu par un deuil de famille, s'est fait excuser et donnera lecture de son rapport annuel à la plus prochaine séance.

M. Larmoyer, trésorier, expose ensuite la situation financière et rend compte de sa gestion pendant l'année sociale écoulée.

Le bilan ci-après est approuvé.

RECETTES.	DÉPENSES.
a). En caisse le 22 novembre 1896 : fr. 4 314,03 b). Cotisations arriérées perçues . . . » 300,00 c). Cotisations de 1896-1897 perçues. » 4 652,50 d). Cotisations anticipatives 1897-98. » 15,00 e). Abonnements au <i>Bulletin</i> . . . » 296,00 f). Vente du <i>Bulletin</i> » 53,00 g). Tirés à part supplémentaires . . » 10,20 h). Dons et Recettes diverses . . . » 16,05 i). Intérêts des fonds déposés . . . » 144,75	a). <i>Bulletin</i>, impressions, planches, etc. . . fr. 1 944,48 Ports » 289,49 Droits d'auteur. » 336,50 b). <i>Séances</i>, gratification de service . . » 55,00 Convocations et ports. » 33,64 c). <i>Secrétariat</i>, indemnité d'employé . . » 300,00 Papeterie et affranchissements. » 258,69 d). <i>Trésorerie</i>, frais de correspondance et de recouvrements » 211,63 e) Souscriptions et divers. » 152,25 Balance. En caisse le 1^{er} novembre 1897 : » 6 219,85
Total. fr. 9 801,53	Total. fr. 9 801,53

M. Del Proposto, *président* de l'Association pour l'année sociale 1897-1898, inaugure les travaux de l'année par l'allocution suivante :

Messieurs et chers Camarades,

L'honneur que vous me faites en m'appelant à la Présidence de l'Association est certainement au-dessus des titres que j'ai pu acquérir à cette distinction depuis mon admission relativement récente à notre Société. Aussi dois-je considérer surtout ma nomination comme un témoignage de sympathie et de confiance qui me touche profondément et dont je remercie tous nos camarades.

En prenant place au fauteuil présidentiel, mon premier devoir est de rendre hommage à celui qui me le cède après l'avoir occupé avec tant de distinction. Mais faire ici l'éloge de M. de Bast, si universellement connu de nous tous et qui a tant de droits à la reconnaissance de l'Association, serait soumettre à une inutile épreuve la modestie un peu extrême qui est la sienne. Je me bornerai à vous dire combien je serais satisfait si je pouvais répondre, comme lui, à la confiance que nos camarades ont placée en moi.

Vous me feriez certainement un reproche mérité si je ne constatais pas à mon tour le dévouement, le tact et le zèle que notre Secrétaire Général apporte dans ses fonctions si importantes ; sans doute l'Association trouvera un jour l'occasion de lui exprimer sa reconnaissance.

Messieurs,

Qu'il me soit permis, pour me conformer à l'usage, d'inaugurer vos travaux de l'année en vous communiquant une œuvre personnelle.

La modeste étude que je vais vous présenter se rapporte aux phénomènes d'électrolyse; il est à souhaiter que cette

communication, comme aussi celle que notre camarade M. Bayet nous a faite au cours de l'année dernière, en appellera d'autres traitant de cette partie de l'électrotechnique, et que ces contributions nous viendront surtout des camarades particulièrement à même de nous donner des résultats pratiques.

* * *

Phénomènes électrolytiques.

Ayant à étudier un voltamètre industriel pour l'électrolyse de l'eau, j'ai eu l'occasion de faire plusieurs remarques que je me propose de vous communiquer en les accompagnant de quelques explications théoriques, suivant les vues modernes sur la théorie des phénomènes électrolytiques.

Lorsqu'on fait varier le courant traversant un bac électrolytique, contenant un électrolyte et deux électrodes, on constate en général que la différence de potentiel entre les électrodes ne varie pas proportionnellement au courant; cela n'arrive pas lorsque les électrodes sont du même métal que celui de l'électrolyte: par exemple, en électrolysant une solution de sulfate de cuivre entre des électrodes en cuivre. On a pu croire tout d'abord que la résistance de l'électrolyte était, en général, une fonction du courant qui le traverse, ce qui revenait à nier la loi d'Ohm pour les conducteurs liquides. La fausseté de cette explication a été démontrée dès le début des recherches électrolytiques, et même l'hypothèse de deux genres de résistances (résistance métallique et résistance électrolytique) que l'on avait introduite pour expliquer un phénomène secondaire dont je parlerai dans la suite, est complètement tombée.

M. Bouty, qui s'est longuement occupé de recherches électrolytiques, a établi nettement qu'un liquide n'a qu'une seule manière de conduire l'électricité, quels que soient les phénomènes particuliers dont les électrodes sont le siège, et, en outre, que la conductibilité du liquide demeure constante, malgré la variété des réactions électrolytiques dont les électrodes deviennent le siège.

Si donc la loi d'Ohm est applicable aux liquides, et si la différence de potentiel ne varie pas proportionnellement au courant, il faut que, quelque part dans le voltamètre, il y ait une force électromotrice, et, en effet, on constate une chute brusque de potentiel entre chaque électrode et le liquide : la somme de ces deux chutes est ce que l'on appelle la *force électromotrice de polarisation* du voltamètre. La polarisation peut se produire tout entière sur une électrode ou partiellement sur les deux suivant la nature chimique des électrodes, leurs formes et leurs dimensions.

Puisque, d'après la loi de Faraday, le travail de décomposition chimique est proportionnel au courant, cette force électromotrice doit être indépendante du courant, de sorte que l'on doit avoir

$$V = e + ri$$

e étant la force électromotrice de polarisation, r la résistance de l'électrolyte, i le courant qui le traverse et V la différence de potentiel entre les électrodes. C'est d'après cette hypothèse que lord Kelvin a établi une formule simple reliant la force électromotrice de polarisation à la chaleur de formation des électrolytes.

Mais, en réalité, le phénomène est beaucoup plus compliqué. On remarquera, en effet, que, suivant la formule de Kelvin, comme on l'interprète généralement, si, aux électrodes d'un voltamètre, on applique une différence de

potentiel inférieure à la force électromotrice de polarisation, le courant ne pourrait pas s'établir d'une façon *permanente*. En effet, la loi de Faraday, qui a été démontrée d'une rigueur absolue, établit que *la quantité d'électrolyte, décomposée pendant l'unité de temps, est simplement proportionnelle au courant*. Il ne peut donc exister de courant sans une décomposition chimique correspondante; comme, d'autre part, il doit y avoir équivalence entre le travail chimique et celui du courant (les pertes par effet Joule non comprises), on voit que la décomposition, avec une différence de potentiel inférieure à la force électromotrice de polarisation, serait contraire au principe de la conservation de l'énergie.

Voici, en fait, ce qui se passe. Au moment de la fermeture du circuit, les électrodes n'étant pas polarisées par le passage d'un courant antérieur, le courant s'établit et sa valeur est à peu près égale à celle qui correspond à la différence de potentiel appliquée et à la résistance de l'électrolyte suivant la loi d'Ohm; mais aussitôt le courant diminue rapidement par suite de la polarisation des électrodes jusqu'à une valeur très faible qui est *toutefois* *appréciable*. M. Bouty a même trouvé que :

« La polarisation augmente avec des vitesses inégales
» aux deux électrodes; son maximum s'observe d'abord au
» pôle négatif; on ne l'observe au pôle positif que beaucoup plus tard, après plusieurs jours seulement, dans le
» cas de courants très peu intenses; par contre, le maximum au pôle positif est plus intense qu'au pôle négatif.
» La vitesse avec laquelle la polarisation s'établit, varie
» d'ailleurs en sens inverse de la surface des électrodes ».

Un examen même superficiel de tous les phénomènes qui se présentent dans l'électrolyse nous entraînerait beaucoup trop loin, c'est pourquoi il faut que je me limite

à quelques remarques générales. Chose curieuse, le passage du courant à travers un électrolyse qui, au premier abord, paraît un phénomène très simple, est, au contraire, d'une complication extrême, ce qui fait qu'aujourd'hui, après un siècle de recherche, les physiciens ne sont pas même d'accord sur les hypothèses à admettre pour expliquer l'électrolyse. Cela tient surtout à notre connaissance incomplète de la constitution moléculaire et atomique des corps et de la nature de l'électricité.

Pour expliquer la polarisation, on admet généralement l'hypothèse de la couche double de Helmholtz. Suivant cette hypothèse, lors du passage du courant dans un liquide, il se formerait une couche de séparation entre chaque électrode et le liquide ; la surface de celui-ci et celle de l'électrode seraient chargées d'électricité de signes contraires. La même chose arriverait, en général, pour chaque électrode, de sorte qu'un voltamètre ordinaire serait l'ensemble de deux condensateurs reliés par une résistance qui est celle de l'électrolyte. Lord Kelvin et M. Lippmann, par des méthodes différentes, ont réussi à calculer la valeur de la distance entre les deux couches électriques d'une électrode : leurs résultats sont à peu près concordants et nous apprennent que cette distance est de l'ordre de grandeur des molécules $\left[\frac{1}{3,10^8} \text{ cm} \right]$.

On conçoit, dès lors, que de tels condensateurs doivent avoir une capacité énorme par unité de surface. Lorsqu'on ferme le circuit d'un voltamètre, le courant s'établit très énergiquement, et il ne fait que charger les deux condensateurs susdits, qui sont ainsi placés en série. A chaque valeur de la différence de potentiel appliquée (supposée inférieure à la force électromotrice de polarisation), calculée suivant la loi de Kelvin, correspond, en régime permanent, une force électromotrice de polarisa-

tion et une charge des deux condensateurs ci-dessus. Il est donc nécessaire qu'une certaine quantité d'électricité passe dans le voltamètre pour que la polarisation atteigne la valeur correspondant à la différence de potentiel appliquée. Le voltamètre fonctionne comme un condensateur et sa capacité est ce que l'on appelle la *capacité de polarisation* du voltamètre correspondant à l'état considéré.

Lors de la rupture du circuit, la différence de potentiel aux électrodes devient égale à la force électromotrice de polarisation : un voltmètre très résistant relié aux électrodes en donne la valeur ; à partir de cet instant, le courant qui parcourt le voltmètre diminue avec le temps, suivant une loi à peu près logarithmique. Si au lieu d'un voltmètre on fait usage d'un électromètre, la déviation diminue beaucoup plus lentement et ne s'annule qu'après plusieurs heures. Il se présente, en somme, pour un voltamètre les mêmes phénomènes que pour les condensateurs : un voltamètre se dépolarise en circuit ouvert comme le diélectrique d'un condensateur et présente aussi des phénomènes de charge résiduelle, comme ce dernier, et peut, dans des conditions spéciales, donner lieu à une décharge oscillante. C'est Maxwell qui a fait ressortir les analogies entre un voltamètre polarisé et un condensateur.

Il est à remarquer que la force électromotrice de polarisation est toujours inférieure à la différence de potentiel appliquée au voltamètre, de sorte qu'il y a *toujours un courant et par conséquent une décomposition chimique* quelle que soit la valeur de la différence de potentiel.

Pour expliquer cette décomposition en contradiction apparente avec le principe de la conservation de l'énergie, on admet l'existence d'une *dissociation électrolytique*.

Autrefois, on expliquait ce phénomène, en admettant que l'électrolyte pouvait avoir deux sortes de résistances : une *résistance métallique* qui laisserait passer le courant

sans décomposition comme pour les métaux, et une *résistance électrolytique* ; cette explication est évidemment en opposition avec la loi de Faraday.

On sait que le passage du courant dans un électrolyte est une espèce de phénomène de convection : les ions transportent l'électricité de l'une à l'autre électrode, et ce transport se fait dans le sens du courant pour les ions électro-positifs et en sens inverse pour les ions électro-négatifs. La résistance électrique de l'électrolyte ne serait due qu'aux frottements qui s'opposent au mouvement des ions. Très probablement, cette manière de voir n'est qu'un mode d'explication du phénomène, qui se passe donc comme si ce transport existait effectivement ; ainsi, on parle couramment en électro-chimie de la *vitesse* des ions, et on sait que les différents ions n'ont pas, en général, la même vitesse.

Suivant Arrhenius et la théorie la plus généralement acceptée, surtout en Allemagne, dans un liquide électrolysable, il existe une partie des ions à l'état de liberté, c'est-à-dire que, dans une solution de sel de cuisine, par exemple, il existe du sodium en liberté. Cette hypothèse, quoique paraissant très étrange au premier abord, est cependant confirmée par un très grand nombre d'essais de natures différentes ; les molécules électrolytiques n'auraient pas donc la même constitution que la molécule chimique. On démontre même que la conductibilité de l'électrolyte mesure sa dissociation et que même les solides peuvent être partiellement dissociés et par conséquent électrolysables. On se rend compte de ce fait dans l'électrolyse des sels fondus, puisque cette électrolyse continue même au voisinage du point de fusion, lorsque le sel est solide. On sait déjà, du reste, que le verre, dans certaines conditions, est électrolysable. Comment, par exemple, le sodium libre dans une solution de chlorure

de sodium n'attaque pas l'eau et y reste à l'état libre, est encore inexpliqué.

Quoiqu'il en soit, l'hypothèse de la dissociation explique bien l'électrolyse sous un voltage inférieur à la force électromotrice de polarisation normale, et rend aussi compte de la continuité de l'électrolyse, qui n'est pas explicable par l'ancienne hypothèse de Grothus.

On s'explique en même temps pourquoi la loi de Kelvin n'est presque jamais vérifiée, et pourquoi on entend souvent les praticiens dire que, pour une certaine opération électrolytique, la force électromotrice théorique est d'autant, tandis que la force électromotrice est pratiquement d'autant. On n'a jamais réussi à construire un voltamètre industriel pour l'électrolyse de l'eau fonctionnant à un peu plus de 1,5 volt, tel que le voudrait la théorie de Kelvin, même lorsque la résistance de l'appareil est négligeable.

Il est des chimistes qui font jouer un grand rôle aux actions secondaires, soit à la formation de certains composés, que, dans la plus grande partie des cas, on ne réussit pas à trouver dans le voltamètre, et qui, si même on les trouve, sont insuffisants pour justifier les grandes variations de la force électromotrice. C'est ainsi, par exemple, qu'on n'a pas encore réussi à nous expliquer ce qui se passe dans un accumulateur ordinaire, et que, périodiquement, on nous en donne une théorie chimique nouvelle. Chose curieuse encore, certains composés secondaires devraient se former continuellement ; il serait évident alors que quelle que petite que soit leur importance, ils devraient finir avec le temps par être en quantité assez grande et bien mesurable.

Certainement, les actions secondaires peuvent avoir, et ont en fait, une réelle importance ; la température et la pression jouent aussi un rôle incontestable, mais la cause

principale de la discordance entre les valeurs théoriques et pratiques de la force électromotrice de polarisation doit être recherchée dans les conditions spéciales, dans lesquelles se trouve l'électrolyte à l'état de solution.

Nous ne voulons pas déduire de tout ce qui précède que la formule de Kelvin est fausse, car ce serait nier le principe même de la conservation de l'énergie ; il est donc bien vrai que la force électromotrice de polarisation correspond à la chaleur de formation de l'équivalent électro-chimique de l'électrolyte ; mais quelle est cette chaleur de formation ?

Il faut bien le dire, le seul moyen que nous avons pour déterminer avec précision la valeur de la force électromotrice de polarisation d'un voltamètre construit d'une certaine façon, est l'expérience, et la formule de Kelvin ne peut servir seulement que de guide.

J'ai électrolysé plusieurs fois une solution de potasse caustique entre deux électrodes en fer, en faisant varier le courant et en mesurant pour chaque valeur de ce dernier la différence de potentiel aux bornes, ainsi que la force électromotrice de polarisation correspondante. J'ai employé pour ces mesures un ampèremètre très sensible, et, comme voltmètre, un galvanomètre Deprez-d'Arsonval avec 200 000 ohms de résistance à la suite, convenablement shunté de façon à avoir une apériodicité suffisante.

J'ai relevé la force électromotrice de polarisation en faisant la lecture au voltmètre tout de suite après avoir coupé le courant. Pour éviter une trop grande dépolarisation avant que la bobine du galvanomètre ait atteint sa position d'équilibre, j'ai employé d'abord la forte résistance de 200 000 ohms, et ensuite je me suis servi d'un voltamètre de grandes dimensions (les électrodes ont une surface utile de 5 décimètres carrés).

Je tiens à faire remarquer que cette méthode n'est pas

très exacte, et qu'il en existe d'autres plus spécialement étudiées, telles que la méthode d'opposition, et que, pour ce genre de mesures, on peut employer des appareils très supérieurs au galvanomètre que j'ai employé; toutefois, l'approximation obtenue est industriellement suffisante.

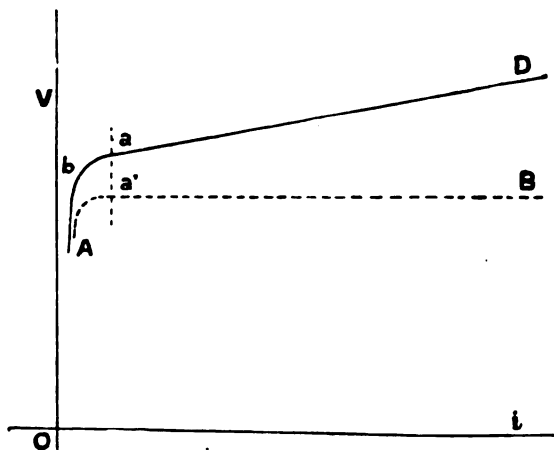


Fig. 1.

En représentant le phénomène par un diagramme ayant comme abscisses les courants et comme ordonnées les différences de potentiel aux bornes (fig. 1), on obtient une courbe telle que CD , laquelle est rectiligne à partir d'un certain point a . AB représente la courbe correspondante des forces électromotrices de polarisation, elle devient rectiligne et horizontale à partir d'un point a' qui se trouve sur la verticale passant par a . Par l'application de la formule

$$R = \frac{V - e}{i},$$

on peut constater l'invariabilité de la résistance, conformément aux résultats de M. Bouty.

Examinons d'un peu près la courbe de la force électromotrice de polarisation, qui est la plus intéressante au point de vue du fonctionnement du voltamètre.

Suivant l'hypothèse de la double couche de Helmholtz, et en admettant que l'épaisseur entre ces couches est constante, on voit aisément que la courbe de la force électromotrice a ses ordonnées proportionnelles aux charges de chaque couche pour un courant donné à travers le voltamètre.

Admettons, comme on le fait généralement, que les deux ions de la molécule électrolytique soient chargés d'électricité de signe contraire, de façon à constituer une espèce d'aimant élémentaire électrique. Sous l'action de la force électrique, les petits aimants seront orientés avec leurs extrémités de même nom du même côté, et l'électrolyte constituera une espèce d'aimant qui ne présente de masses libres qu'aux surfaces en contact avec les électrodes. *L'intensité d'aimantation* moyenne, qui correspond à la polarisation dans les condensateurs, serait égale à la densité moyenne d'électricité sur les faces extrêmes de l'électrolyte, et l'intensité du courant correspond à l'intensité du champ dans les phénomènes d'aimantation.

L'analogie des deux phénomènes est mise en relief par la forme de la courbe de la force électromotrice de polarisation; celle-ci est, en effet, comparable à la courbe d'aimantation d'un barreau de fer, partant de l'état neutre. Elle se compose de deux parties sensiblement droites, raccordées par une partie curviligne.

Si on tient compte de la différence essentielle entre un liquide et un solide, qui consiste dans la plus grande mobilité des molécules, on explique suffisamment les différences entre la courbe de la polarisation et la courbe du magnétisme

En effet, il est facile de voir que si les molécules du fer

étaient aussi libres que les molécules d'un électrolyte, une très faible force magnétisante amènerait le fer à la saturation : c'est ce qui arrive lorsqu'on aimante le fer pendant qu'il se dépose électrolytiquement. On peut donc admettre, comme suffisamment expliqué, la constance de la polarisation à partir d'une certaine valeur de la différence de potentiel appliquée au voltamètre : les molécules de l'électrolyte sont orientées au maximum, et leur orientation ne peut plus augmenter pour un accroissement quelconque du courant.

Dans mes recherches, je ne me suis pas occupé de l'existence possible d'un *hystérésis électrolytique*, mais je suis tenté de croire qu'il doit exister, puisque la polarisation d'un électrolyte est un phénomène intermédiaire entre celle du diélectrique d'un condensateur et l'aimantation d'un barreau de fer, et que, dans ces deux derniers phénomènes, l'hystérésis existe.

Je dois cependant faire remarquer que, dans ce cas, l'hystérésis serait de nature à fausser les résultats des mesures de résistances des électrolytes par la méthode des courants alternatifs, à moins qu'il n'arrive pour l'électrolyte ce qui arrive pour l'aimantation du fer sous l'action de forces magnétisantes excessivement rapides ; on sait que, dans ce cas, le fer ne s'aimante presque pas. Sous l'action d'un courant alternatif de très grande fréquence, les molécules de l'électrolyte pourraient ne pas s'orienter ce qui expliquerait en même temps que, dans ces mesures, la capacité de polarisation des électrodes, qui n'est d'ailleurs qu'une conséquence de l'orientation des molécules, n'a qu'une minime influence, ainsi que M. Kohlrausch l'a fait remarquer.

En faisant ressortir la ressemblance entre la polarisation électrolytique et l'aimantation, je n'ai nullement eu l'intention d'établir une théorie spéciale de cette dernière.

J'ai cependant eu l'occasion de constater qu'elle pouvait servir pour expliquer une série de phénomènes, et c'est à ce titre qu'elle peut avoir une certaine utilité.

J'appliquerai les considérations précédentes à un cas fort intéressant en pratique, celui de l'électrolyse entre deux électrodes, séparées par un diaphragme métallique assez épais, pour que le transport des ions ne puisse pas se faire à travers la paroi.

Mes essais ont toujours été faits pour électrolyser l'eau, moyennant une solution concentrée de potasse caustique et des électrodes en fer. Le voltamètre employé (fig. 2), était composé de deux tôles en fer A et B, fonctionnant comme électrodes ayant exactement les dimensions du récipient ; entre les deux électrodes A et B, je pouvais

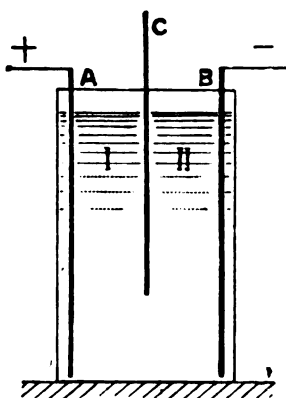


Fig. 2.

faire plonger plus ou moins une troisième tôle C, fonctionnant comme diaphragme ou bien une plaque en verre ayant les mêmes dimensions que C. J'ai pris de telles dispositions que la communication entre les deux compartiments I et II ne pouvait se faire que par le dessous du diaphragme.

Dès le début de mes essais, j'ai remarqué que si on maintient constant le courant qui traverse le voltamètre, la différence de potentiel entre les électrodes augmente au fur et à mesure que l'on plonge le diaphragme en fer C jusqu'à un maximum, qui a lieu lorsque le diaphragme C est à fond et qu'il n'existe presque plus de communication liquide entre les deux compartiments I et II : ce maximum est cependant toujours inférieur au double de la différence de potentiel existante entre les électrodes A et B lorsqu'il n'y a pas de diaphragme.

Si, au contraire, on plonge une plaque en verre, on constate que, pour une même surface immergée et pour un même courant, l'augmentation du voltage est beaucoup plus considérable ; à la limite, c'est-à-dire lorsque la plaque en verre est complètement immergée, le courant est coupé, comme il est facile de prévoir.

Étant donné que, suivant ce que je viens de dire, le passage du courant dans un électrolyte est un phénomène de convection, que, par conséquent, ce sont les ions qui transportent l'électricité, et que ce transport doit se faire toujours par en dessous du diaphragme par les conditions mêmes de l'expérience, on ne voit pas au premier abord à quoi attribuer la grande différence de fonctionnement des deux genres de diaphragme, puisque les trajectoires décrites par les ions doivent être à peu près les mêmes dans les deux cas, surtout si la distance entre les électrodes A et B est assez petite.

Dans le but d'éclaircir cette difficulté, j'ai fait des mesures en me servant des appareils déjà indiqués, et en prenant les mêmes précautions. Je suis arrivé aux conclusions suivantes :

1° Pour un courant donné à travers le voltamètre, on peut déplacer, parallèlement à lui même, le diaphragme métallique immergé à une profondeur constante, sans

provoquer aucune variation sensible de la différence de potentiel entre les électrodes.

2° La force électromotrice de polarisation, correspondant à un courant donné à travers le voltamètre et mesuré par la méthode indiquée, augmente au fur et à mesure que l'on plonge le diaphragme plus profondément.

3° La force électromotrice entre l'électrode positive et le diaphragme, mesurée aussitôt après rupture du courant, est environ trois fois celle mesurée entre le diaphragme et l'électrode négative. Leur somme est toute-fois égale à la force électromotrice totale entre les électrodes.

4° Si l'on calcule la résistance du voltamètre d'après la formule $r = \frac{V - e}{i}$, on trouve que, pour une position donnée du diaphragme, la résistance diminue lorsque le courant augmente.

5° Si, pour une position donnée du diaphragme, la densité de courant devient suffisamment grande, on constate un développement de gaz sur les deux faces du diaphragme et une diminution marquée de la résistance calculée comme précédemment.

En recherchant, j'ai trouvé que ce dernier phénomène était déjà connu depuis 1886. M. Semmola (*) lui a donné le nom d'*électrolyse secondaire*, pour la distinguer de l'électrolyse principale qui se manifeste sur les électrodes. M. Semmola a employé un voltamètre construit comme l'indique la fig. 3: *c* et *d* sont les électrodes en platine, *mn* est un ruban en zinc amalgamé; l'électrolyte est une solution étendue d'acide sulfurique. Au passage du courant, le ruban de zinc se polarise, l'extrémité *n* est

(*) *Lumière Électrique*, vol. 28. 27 mai 1886.

le siège d'un dégagement d'hydrogène, tandis que l'oxygène qui devrait se dégager en *m* se combine avec le zinc. Dans ces conditions, M. Semmola trouve que le dégagement d'hydrogène en *n* est beaucoup plus sensible que si le ruban est inattaquable (en or ou en platine). Cela s'explique par le fait que la polarisation se produit toute à

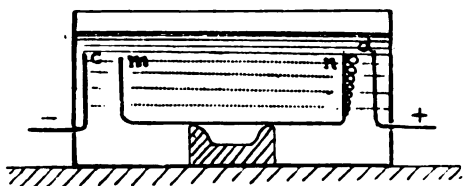


Fig. 3.

l'extrémité *n* du ruban. Le rapport entre le volume d'hydrogène se dégageant au ruban et celui qui s'échappe à l'électrode négative diminue au fur et à mesure que la conductibilité du bain augmente et que le courant total diminue.

L'importance de l'électrolyse secondaire varie avec la position du ruban et elle est maximum lorsque le ruban est disposé comme dans la figure. Si on plonge plusieurs rubans dans le liquide, ils deviennent tous le siège de dégagements gazeux ; ceux-ci diminuent cependant très rapidement au fur et à mesure que l'on retire les rubans du liquide. Tout phénomène d'électrolyse secondaire cesse à partir d'une certaine valeur de l'intensité du courant.

Les résultats de mes essais et ceux de M. Semmola, quoique ces derniers soient fort incomplets au point de vue électrique, nous permettront d'expliquer le fonctionnement des diaphragmes.

Reprenons notre voltamètre simple polarisé. Par suite

de l'analogie entre la polarisation électrolytique et l'aimantation, que nous avons fait ressortir, nous pouvons dire que les lignes de flux seront distribuées à peu près uniformément; nous devons dire à peu près, car la force électromotrice de polarisation en chaque point de l'électrode dépend de la pression en ce point et, en général, de la position du point par rapport aux contours de la partie immergée de l'électrode.

Dans le bain électrolytique, imaginons qu'on opère une section XX (fig. 4), de telle nature qu'elle ne laisse passer aucune ligne de force; le courant devra nécessairement se distribuer comme l'indiquent les lignes en pointillé et la

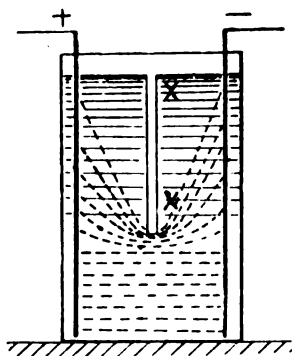


Fig. 4.

résistance de l'électrolyte augmentera; telle est l'explication du fonctionnement du diaphragme isolant. Il est possible que même la cloison en verre se polarise, mais sa polarisation est certainement très-faible, de sorte qu'on ne fait pas grande erreur en la négligeant.

Dans mes essais, j'ai pu constater que *l'augmentation de voltage pour un courant donné à travers le voltamètre suit à peu près la même loi que la chute de pression provoquée par l'étranglement d'une conduite d'eau.*

Supposons maintenant qu'un corps fonctionnant comme diamagnétique soit disposé suivant XX (fig. 4), les lignes de flux aboutissant à la fente seront repoussées en bas et on aura une distribution de courant analogue à celle indiquée dans la fig. 5.

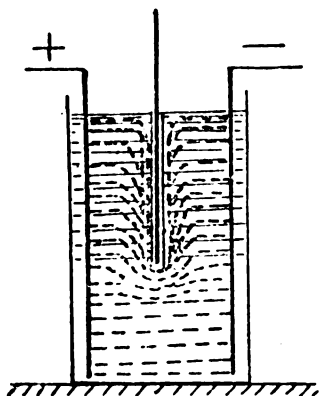


Fig. 5.

Cette distribution peut encore être expliquée de la manière suivante :

Considérons l'état de la polarisation en chaque point du voltamètre pour une position donnée du diaphragme, et tout d'abord remarquons que lors de la décomposition de la potasse caustique, les deux ions K et OH se déplacent avec des vitesses qui sont entre elles respectivement 1 à 3 environ. Dans l'hypothèse de la constance de l'épaisseur entre les doubles couches de Helmholtz, la polarisation de la plaque positive, en régime normal, doit être trois fois plus grande que celle de l'électrode négative, et la même chose doit arriver en chaque point du diaphragme. Remarquons, en outre, qu'à la partie inférieure du diaphragme doit exister une ligne neutre où la polarisation est nulle.

Si, en tenant compte de ces considérations, pour chaque point des électrodes et du diaphragme, on tire une horizontale et si, sur celle-ci on porte une longueur proportionnelle à la polarisation de la plaque au point considéré, on obtiendra une distribution analogue à celle indiquée en hachures dans la fig. 6.

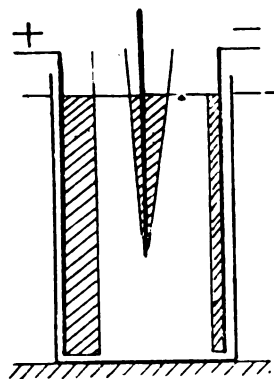


Fig. 6.

Très probablement, la distribution de la polarisation n'est pas aussi simple, mais il est probable qu'au moins qualitativement il en est ainsi.

Cette distribution explique nettement le rapport de 1 à 3 que l'on trouve entre les forces électromotrices mesurées entre le diaphragme et chaque électrode ; on s'en convaincra par la simple inspection de la figure.

Considérons les surfaces du liquide en contact avec le diaphragme du côté de l'électrode positive ; par suite de la non uniformité de la polarisation, et dans l'hypothèse de la constance de l'épaisseur entre les deux couches de Helmholtz, la surface du liquide sera chargée de masses électriques plus denses à la partie supérieure qu'à la partie inférieure. Elle ne sera donc pas équipotentielle ;

il s'ensuit qu'un ion positif venant de l'électrode positif sera tiré en bas puisqu'il tend à aller vers les points à potentiel le moins élevé et qu'un ion négatif tendra à faire le chemin inverse ; la même chose se passe de l'autre côté du diaphragme où le liquide se termine par des ions négatifs ; un ion positif sera évidemment sollicité vers le haut, tandis qu'un ion négatif sera, au contraire, sollicité vers le bas.

La polarisation du diaphragme engendre donc une force électromotrice qui aide le passage du courant ; cette force électromotrice est due à la non uniformité de la polarisation *et ne doit pas être confondue avec la polarisation du diaphragme même.*

Si on appelle ε la valeur de cette force électromotrice, on doit avoir .

$$i = \frac{V - \varepsilon + \varepsilon}{R},$$

dans laquelle R a à peu près la même valeur que dans le cas du diaphragme isolant, puisque les lignes de flux sont dirigées à peu près de la même façon ; c'est donc grâce à ε que l'on ne constate plus la même surélévation de voltage pour un courant donné à travers le voltamètre.

Si on mesure la différence de potentiel entre les électrodes tout de suite après avoir coupé le courant, on n'a pas du tout la somme des forces électromotrices agissant dans le phénomène. En effet, on ne mesure certainement pas ε , puisque la non uniforme distribution des masses susdites cesse lorsque le courant cesse, et on tient compte par contre de la *polarisation moyenne* de l'électrode qui, comme nous l'avons dit, n'est pas la même chose que ε . *Il s'ensuit que toute détermination de la résistance du voltamètre faite par cette méthode ne peut être considérée, ni scientifiquement, ni pratiquement comme exacte.*

La force électromotrice déterminée par cette méthode augmente, soit en enfonçant davantage le diaphragme, soit en augmentant le courant total, c'est que dans les deux cas, la polarisation moyenne du diaphragme augmente. Cette polarisation ne peut donc pas être représentée exactement comme dans la fig. 6.

Le fait que la résistance calculée par cette méthode diminue lorsque le courant augmente s'explique si l'on admet que la polarisation moyenne du diaphragme augmente plus vite que le courant total; il se peut même, d'ailleurs, que la variation de la polarisation du diaphragme provoque aussi un changement dans les lignes de flux, de façon que la résistance soit effectivement diminuée, mais la méthode ne peut pas donner cette variation.

Puisque la polarisation du diaphragme augmente, soit en enfonçant celui-ci, soit en augmentant le courant, il est évident que, pour chaque position du diaphragme, il existe un courant pour lequel la somme de la polarisation maxima du diaphragme et celle d'une électrode devient égale à la force électromotrice de polarisation de l'électrolyte; alors il y aura dégagement gazeux au diaphragme ou *électrolyse secondaire*. La résistance totale de l'électrolyte doit évidemment diminuer, puisqu'une partie des ions ne sera plus obligée de passer par dessous le diaphragme. A la rigueur, un dégagement existe toujours, puisqu'il existe une polarisation et un courant, mais il est négligeable.

On explique en même temps pourquoi l'importance de l'électrolyse secondaire diminue lorsqu'on augmente la conductibilité de l'électrolyte; les ions choisissent naturellement le chemin le plus facile pour eux.

Les considérations précédentes permettent de se rendre compte assez exactement du fonctionnement du diaphragme métallique, lequel peut être très utile dans beaucoup de voltamètres industriels.

Elles peuvent servir pour déterminer d'avance et grossièrement les rapports entre les dimensions d'un appareil industriel; les dimensions et les dispositions ne pouvant être établies que par l'expérience.

Je serais très heureux si ces considérations ont pu réussir à vous donner un aperçu de quelques idées modernes sur les phénomènes électrolytiques et à vous montrer l'incertitude de leur théorie.

On le voit, cette incertitude laisse ouvert un champ de recherches très étendu et d'autant plus intéressant que les applications de l'électrochimie auront certainement une importance croissante dans l'avenir.

(*Applaudissements.*)

M. Eric Gerard, *vice-président d'honneur*. Je suis heureux que ma présidence accidentelle me permette de féliciter M. Del Proposto de son beau travail sur l'électrolyse.

Les résultats qualificatifs qu'il nous a communiqués sont tellement encourageants que nous espérons qu'il poursuivra ses études dans cette voie et nous présentera bientôt des données quantitatives. (*Applaudissements.*)

M. Del Proposto, *président*. Je dépose le travail intitulé : « *Gli apparecchi del Marconi e le esperienze alla Spezia* » de notre camarade M. Della Riccia, élève de l'Institut Montefiore.

Ce travail complète l'aperçu que j'ai donné en séance du 1^{er} août dernier sur la télégraphie système Marconi, en donnant un résumé assez complet de la théorie de la transmission des ondes électromagnétiques; j'espère que notre camarade, qui a assisté aux essais faits en Italie, voudra bien le développer devant nous dans une séance ultérieure.

La séance est levée à midi.

SÉANCE DU 12 DÉCEMBRE 1897



Ont signé la liste de présence : MM. Aragon, Baleste, Batigne, Bayet, Bodde, Boulanger, Briffaux, Centonze, Cheftel, Coops-Busgers, De Bast, Della Riccia, Del Proposto, Exelbirth, Gerard Eric, Herzen, Henrion, Kroll, L'Hoest, Luc, Moens, Mugica, Muth, Noirfalise, Pirard A, Pirard E, Raudot, Robert L., Roussakoff, Rutten, Vandecapelle, Van der Hecht, Viscidi, Zocchi.

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

La parole est donnée à **M. De Bast**, pour la suite de sa communication sur les

Éléments du calcul des générateurs électriques à courants alternatifs.

MARCHE A SUIVRE DANS L'ÉTUDE D'UN AVANT-PROJET D'ALTERNATEUR.

Données du projet. — Voyons, à présent, comment on peut conduire les calculs en vue de déterminer les éléments de construction d'un alternateur de type donné.

La fréquence, $\frac{1}{T} = f$ périodes par seconde, la puissance électrique moyenne disponible, P watts, la différence de potentiel efficace aux bornes, V_{eff} volts, et la vitesse angulaire préférée, N' révolutions par seconde, sont imposées.

La nature du circuit que doit desservir la machine détermine, d'ailleurs, le facteur de puissance $\cos \varphi$, défini par le rapport de P au produit de V_{eff} par l'intensité efficace du courant utile, I_{eff} . On sait que, lorsque les variations périodiques de la différence de potentiel aux

bornes et du courant débité suivent des lois sinusoïdales simples, ce facteur a pour expression le cosinus de l'angle qui représente le décalage respectif des phases de ces deux grandeurs.

Pour l'évaluation du courant utile par la formule

$$I_{\text{eff}} = \frac{P}{V_{\text{eff}} \cos \varphi} \text{ ampères,} \quad (A)$$

on se guidera sur les renseignements suivants dans le choix de la valeur à attribuer à $\cos \varphi$, si celle-ci n'est pas expressément stipulée : dans les réseaux n'alimentant que des lampes électriques, directement ou par l'intermédiaire de transformateurs statiques fonctionnant à pleine charge, $\cos \varphi$ est pratiquement égal à 1 ; sa valeur moyenne peut être estimée entre 0,65 et 0,85 dans les circuits de moteurs asynchrones, selon la puissance de ces appareils, et entre 0,70 et 0,75 quand il s'agit d'un service mixte d'éclairage et de distribution de puissance.

Une autre donnée du problème est la différence limite $\pm V_{\text{ef}}$, volts, admissible entre les tensions aux bornes de l'alternateur, quand le débit passe de zéro à la valeur maxima, tandis que le courant d'excitation normal traverse les bobines inductrices. On exige ordinairement que l'écart relatif extrême $\pm$ des voltages ne dépasse pas 0,05 quand la machine doit desservir des circuits non inductifs, tels que ceux de lampes à incandescence, et 0,15 quand elle doit activer des alternomoteurs.

Enfin, un rendement industriel minimum est souvent de rigueur.

Déductions résultant directement des données. —

Les données imposées entraînent quelques conséquences immédiates.

Nombre de pôles. — f et N' déterminent le nombre des pôles inducteurs par les expressions $\frac{2f}{N'}$ ou $\frac{f}{N'}$, suivant qu'il s'agit d'un alternateur à pôles de noms contraires ou d'un alternateur à pôles de même nom. On adoptera, dans le premier cas, le nombre entier pair, dans le second cas, le nombre entier le plus voisin du quotient trouvé, ce qui conduira, en général, à modifier légèrement la vitesse angulaire en l'amenant à la valeur

$$N = \frac{2f}{p} \text{ ou } \frac{f}{p},$$

p désignant le nombre de pôles requis.

Force électromotrice induite. — Le tantième z que ne peut excéder la différence entre les voltages aux bornes de l'armature à circuit ouvert et à circuit fermé, fixe sensiblement à

$$E_{\text{eff}} = (1 + z) V_{\text{eff}} \text{ volts} \quad (\text{B})$$

la force électromotrice que doit développer, en pleine charge, dans l'enroulement induit, le flux magnétique engendré par le système inducteur.

Chute de tension maxima dans l'induit. — La chute de potentiel à l'intérieur de l'armature débitant le courant normal est également déterminée. On peut la déduire de la formule (3) établie plus haut, en adoptant, dans un premier calcul, pour résistance de l'enroulement induit une valeur approximative estimée d'après l'importance relative de l'effet Joule dans les armatures des alternateurs existants et majorée, au double par exemple, pour tenir compte de la réaction des courants de Foucault induits dans les pièces polaires de l'inducteur. Il est plus commode et suffisant, pour les tâtonnements du début, d'utiliser la formule sous la forme simple (3'), à laquelle on arrive en

négligeant l'effet de cette réaction et la résistance électrique des conducteurs induits vis-à-vis de la réactance de ceux-ci. On trouve ainsi, en résolvant l'équation simplifiée par rapport à $\mathcal{E}_{\text{eff}}$,

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = -V_{\text{eff}} \sin \varphi + \sqrt{E_{\text{eff}}^2 - V_{\text{eff}}^2 \cos^2 \varphi} \text{ volts,}$$

le signe $+$ étant seul admissible devant le radical, ou encore, en remplaçant E_{eff} par $(1 + z) V_{\text{eff}}$,

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = V_{\text{eff}} [\sqrt{z^2 + 2z + \sin^2 \varphi} - \sin \varphi] \text{ volts.} \quad (\text{C})$$

Coefficient de self-induction de l'induit. — Cette chute de tension implique pour le coefficient de self-induction de l'armature une valeur définie par l'une des équations (2) ou (2'). La dernière donne

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{E}_{\text{eff}}}{2\pi f I_{\text{eff}}} \text{ henrys.} \quad (\text{D})$$

Problème à résoudre. — Comme on le voit, indépendamment de la question de rendement, l'alternateur à l'étude satisfera aux conditions prescrites pourvu que son excitation soit capable de développer dans l'armature une force électromotrice induite déterminée par la formule (B) et que le coefficient de self-induction de son enroulement induit n'excède pas la valeur à laquelle conduit l'expression (D).

Or, la force électromotrice induite est liée au nombre total n de fils actifs de l'armature et au flux inducteur utile $\mathcal{N}$ issu d'un pôle par l'équation

$$E_{\text{eff}} \cdot 10^8 = k p n N \mathcal{N}$$

démontrée précédemment. On se rappelle que k est un coefficient qui dépend essentiellement de la nature et de la forme des surfaces polaires de l'inducteur ainsi que

des largeurs circonférentielles relatives de celles-ci, des intervalles qui les séparent et des faisceaux équidistants de conducteurs induits. D'autre part, des considérations exposées dans le paragraphe relatif à l'expression du coefficient de self-induction de l'armature des alternateurs, nous avons déduit la relation suivante, en désignant par $\Sigma \mathcal{R}$ la reluctance que présente, avec les inductions dues uniquement au flux inducteur, un des p circuits magnétiques dérivés semblablement répartis entre l'ensemble de la carcasse de la machine :

$$\frac{\Sigma \cdot 10^9}{j} = \frac{1}{p \text{ ou } \frac{1}{4}p} \cdot \frac{4\pi n^2}{\Sigma \mathcal{R}}.$$

Le paramètre $\frac{1}{p}$ convient aux alternateurs à pôles de noms contraires, $\frac{1}{\frac{1}{4}p}$ aux machines à pôles de même nom. Le coefficient j peut s'estimer, comme on sait, d'après les données expérimentales recueillies sur des alternateurs existants (*).

On conclut de ce qui précède que l'étude du projet d'un alternateur consiste dans la recherche des meilleures proportions à attribuer aux divers éléments de la machine pour réaliser une solidité mécanique parfaite, un échauffement modéré et un rendement satisfaisant, tout en assu-

(*) Les renseignements nécessaires pour la détermination du coefficient $j = \frac{\Sigma}{\Sigma_0}$ d'un alternateur existant sont :

1) La force électromotrice efficace, E_{eff} volts, développée à circuit ouvert, à la vitesse normale et avec le courant inducteur de pleine charge; 2) l'intensité efficace, I_{eff} ampères, du courant débité en court-circuit dans les mêmes conditions d'excitation; 3) la fréquence, f périodes par seconde; 4) la résistance, R ohms, de l'enroulement induit entre les bornes terminales; 5) le nombre total n et le mode de liaison des conducteurs actifs de l'armature; 6) la nature du système

rant aux expressions $k n \mathfrak{K}$ et $\frac{n^2}{\Sigma \mathfrak{R}}$ les valeurs A et B ci-après, imposées par les données du problème :

$$k n \mathfrak{K} = \frac{E_{\text{eff}} \cdot 10^8}{p N} = A, \quad (\text{E})$$

$$\frac{n^2}{\Sigma \mathfrak{R}} = p \text{ ou } 4p \cdot \frac{\mathfrak{L} \cdot 10^9}{4 \pi j} = B. \quad (\text{F})$$

Calcul des inducts à noyau magnétique. — Comme points de départ du calcul des armatures à noyau en fer, on peut prendre le diamètre d'une circonférence des tôles constituantes et la perte de puissance par hystérésis dans l'induit.

On se donnera le diamètre considéré, en ayant égard à la

inducteur et le nombre p de ses projections polaires; 7) les dimensions du noyau de l'induit, des entrefers et des diverses parties constituant la carcasse de l'inducteur; 8) la disposition sur l'armature des conducteurs des faisceaux induits.

La valeur du numérateur de l'expression du coefficient j est

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2 \pi f} \sqrt{\frac{E_{\text{eff}}^2}{I_{\text{eff}}^2} - 4 R^2} \text{ henrys.}$$

Celle du dénominateur résulte de la formule

$$\mathfrak{L}_0 = \frac{10^{-9}}{p \text{ ou } 4p} \cdot \frac{4 \pi n^2}{\Sigma \mathfrak{R}} \text{ henrys,}$$

lorsque tous les conducteurs induits sont reliés en série entr'eux

Pour évaluer la reluctance $\Sigma \mathfrak{R}$ que présente chacun des p circuits magnétiques semblables de la machine, dans les conditions d'induction déterminées par le flux inducteur correspondant au courant d'excitation de pleine charge, on tracera, d'après les données 7), un fragment d'épure de l'alternateur, afin de relever les longueurs et sections moyennes à introduire, pour chaque élément du circuit,

vitesse linéaire maxima qu'il est prudent de ne pas dépasser dans l'organe mobile de la machine. La vitesse périphérique des induits tournants varie, en pratique, de 10 à 35 mètres par seconde et s'élève même jusqu'à 45 mètres dans certaines armatures à anneau aplati; la vitesse linéaire limite est souvent comprise entre 20 et 30 mètres par seconde dans les inducteurs rotatifs pourvus de bobines magnétisantes participant au mouvement; elle peut atteindre 35 et 40 mètres par seconde dans le fer tournant des alternateurs à enroulements inducteurs et induits fixes.

D'autre part, la considération du rendement industriel à atteindre et l'estimation, d'après l'examen des conditions de fonctionnement de machines existantes, de l'importance probable des effets Joule dans les enroulements électriques de l'induit et de l'inducteur, et de l'influence

dans l'expression générale $\frac{L}{\mu S}$ de la résistance magnétique d'un milieu homogène, et l'on calculera par la formule

$$\mathcal{R} = \frac{10^8}{2 f \text{ ou } f'} \cdot \frac{E'_{\text{eff}}}{k n}$$

le flux inducteur utile issu d'un pôle, en vue d'en déduire les inductions et partant les perméabilités de ces éléments. On ne perdra pas de vue qu'à cause de la dispersion latérale de lignes de force autour des projections polaires, le flux total entretenu par l'inducteur est supérieur à celui qui s'échappe dans l'induit. Par convention, on tiendra compte ici du rapport ν des valeurs relatives de ces deux flux qui correspond au courant magnétisant de pleine charge lorsque le débit de l'induit est nul. Sa détermination expérimentale sur la machine au repos est aisée par la méthode balistique appliquée par MM. Hopkinson aux dynamos à courant continu. Au besoin, il suffira d'en estimer la valeur par un calcul basé sur les lemmes de Forbes ou par comparaison avec les résultats trouvés sur d'autres alternateurs. L'épure servira également à la recherche graphique du coefficient k , pour laquelle le renseignement 8) est requis.

des frottements et des autres causes secondaires de dissipation d'énergie, telles que les courants de Foucault dans les tôles de l'armature, dans les pièces polaires de l'inducteur et dans les conducteurs induits, permettront de fixer plus ou moins judicieusement la puissance que l'on peut consacrer à l'hystérésis dans le fer de l'armature. Si le noyau de celle-ci est denté ou perforé, on pourra aussi prédéterminer approximativement, par comparaison, la répartition de cette puissance entre les parties pleines et évidées de la masse magnétique.

Les résultats auxquels conduiront, dans un calcul d'essai, la valeur de la perte par hystérésis et le diamètre d'armature, ainsi adoptés provisoirement, montreront s'il y a lieu de les modifier et dans quel sens.

Alternateurs à pôles de noms contraires. — Supposons d'abord qu'il s'agisse de l'induit à anneau ou à tambour d'un alternateur à pôles de noms contraires.

Les molécules des tôles en fer constituant le noyau sont soumises à des renversements périodiques d'aimantation, de telle façon que leur état magnétique parcourt $\frac{p}{2}$ cycles complets par révolution de l'organe tournant. Abstraction faite de la partie dentée ou perforée du noyau, quand celui-ci n'est pas lisse, l'amplitude des oscillations de l'induction dans un cycle est égale à l'induction maxima que détermine, à travers une section du noyau faite par un plan axial, le flux effectif moyen résultant de la combinaison du flux sensiblement constant qu'entretient le courant inducteur et de la réaction magnétique essentiellement variable de l'induit. Cette induction est à celle, $\mathfrak{B}$, que produirait le flux inducteur considéré isolément, dans un rapport peu différent de celui des valeurs efficaces de la force électromotrice effective et de la force électromotrice induite. Mais la cons-

truction graphique de la fig. 26 montre que, dans le cas ordinaire où le vecteur $I_{\text{eff}}R$ est très petit relativement à V_{eff} , on peut, sans grande erreur, évaluer la force électromotrice effective efficace à la différence de potentiel efficace aux bornes. D'ailleurs $\frac{V_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{1}{1+z}$.

La dissipation d'énergie que le phénomène d'hystérésis occasionne par seconde et par cm^3 de métal magnétique dans la partie pleine du noyau peut donc être exprimée en watts, suivant la formule bien connue de M. Steinmetz, par

$$\gamma \left[\frac{1}{1+z} B \right]^{1.6} \frac{f}{2} N \cdot 10^{-7}.$$

A défaut d'essais magnétiques préalables précisant, pour la qualité particulière de fer des tôles à utiliser, la valeur du coefficient d'hystérésis γ , on peut poser $\gamma = 0,003$. Soit D cm le diamètre moyen attribué au noyau de l'armature, supposé réduit à sa partie pleine s'il s'agit d'un induit cuirassé. Si l'on désigne, en cm, par b la longueur du noyau parallèlement à l'axe de rotation et par h la hauteur radiale des tôles non compris, le cas échéant, la zone dentée ou perforée, le volume de fer correspondant à cette hauteur est

$$\zeta \pi D h b \text{ cm}^3,$$

ζ étant un facteur de réduction, variant entre 0,85 et 0,95, destiné à tenir compte de l'espace occupé par les intercalaires isolantes (papier ou vernis) séparant les tôles.

En représentant par $y P$ la perte de puissance par hystérésis admise dans la masse de fer considérée, on peut écrire, puisque $\frac{f}{2} N = f$,

$$y P = \gamma \left[\frac{1}{1+z} B \right]^{1.6} f 10^{-7} \cdot \zeta \pi D h b. \quad (G')$$

De cette formule, on déduira le produit des dimensions h et b du noyau de l'induit, en attribuant à l'induction effective $\left(\frac{I}{1+z} \cdot 33\right)$ une valeur convenable. Cette valeur, variable avec la fréquence, oscille, dans les bons alternateurs, autour de celles renseignées dans le tableau ci-après :

f	$\frac{I}{1+z} \cdot 33$
40 périodes par seconde	6 000 C. G. S.
50 » »	5 250 »
60 » »	4 750 »
80 » »	4 000 »
100 » »	3 500 »
120 » »	3 000 »

En joignant au produit $h b$ une autre relation entre ses deux facteurs, ou entre l'un d'eux et D , adoptée par comparaison d'après les dimensions relatives d'alternateurs existants, on déterminera la longueur du noyau de l'induit parallèle à l'axe de rotation et son épaisseur radiale comptée, si les conducteurs induits doivent être abrités dans des canaux, seulement jusqu'au fond de ces derniers ; les diamètres limites des parties intactes des tôles, $D + h$ et $D - h$, en résulteront, et l'on pourra commencer le tracé à l'échelle d'une épure du noyau.

Lorsque les pôles inducteurs recouvrent une des surfaces cylindriques de l'armature, on se donnera, par exemple, le rapport $\frac{h}{(D \pm h) \sin \theta}$, θ étant l'angle au centre sous-tendu par une pièce polaire dans un plan normal à l'axe de rotation (le signe $+$ convient aux inducteurs entourant extérieurement l'armature ; le signe $-$ répond au cas inverse). Il résulte, en effet, des différences peu marquées

que présentent, dans les armatures destinées à fonctionner sous la même fréquence, les valeurs de l'induction maxima à travers une section axiale du noyau induit, qu'à égalité de fréquence et de champ moyen dans l'entrefer, l'expression considérée varie peu dans les alternateurs à pôles de noms contraires. On peut s'en convaincre en remarquant que, dans ces machines, le flux magnétique qui, par cm de longueur commune des surfaces polaires et de l'induit, converge dans ce dernier vers chaque pôle, est égal au produit de $2 \, \zeta \, h$ par l'induction dont il vient d'être question et, aussi, au produit de $\frac{1}{2} (D \pm h) \, \theta$ par l'intensité moyenne du champ dans l'entrefer, en négligeant devant $(D \pm h)$, dans le cas des induits cuirassés, la hauteur de la denture ouverte ou fermée du noyau.

Il est aisé de voir que, pour les alternateurs à anneau dont les pôles inducteurs affleurent latéralement le noyau de l'induit, c'est l'expression $\frac{b}{D \, \theta}$ qui est sensiblement constante et qu'on sera, par suite, amené à se donner

Notons que l'angle θ de l'alternateur à l'étude est défini par la largeur relative, rapportée à l'écartement circonférentiel des milieux des pôles voisins et variant en pratique entre 0,4 et 0,8, qu'on se propose d'attribuer à ces derniers dans le sens du mouvement.

Le flux inducteur $\mathfrak{K}$ issu d'un pôle et se bifurquant à travers l'induit vers les pôles adjacents de nom contraire a pour expression

$$\mathfrak{K} = 2 \, \zeta \, h \, b \, \mathfrak{B}. \quad (H')$$

Ce flux, que chaque pôle doit amener à l'armature, étant déterminé, l'équation de condition (E) permet de calculer le nombre total de conducteurs actifs dont il faut pourvoir l'induit.

Ce calcul est simple quand il s'agit d'un induit denté ou perforé dont les conducteurs logés dans une même rainure ou perforation du noyau sont le siège de forces électromotrices d'induction sensiblement en concordance de phases. En effet, étant donnés la largeur relative attribuée aux pôles par rapport à la distance des milieux de ceux-ci et la distribution circonférentielle des conducteurs induits que l'on se propose d'adopter, on peut alors déterminer, au préalable, par la méthode graphique proposée dans une autre partie de cette étude, la valeur du coefficient k , attendu que, dans ce cas, elle ne dépend pas du nombre total des fils actifs et qu'on peut, par conséquent, pour l'évaluer, supposer ceux-ci figurés en nombre et en position par les canaux entre lesquels ils doivent être répartis.

Lorsqu'on a affaire à une armature dont l'enroulement est appliqué contre un noyau magnétique lisse, la résolution de l'équation (E) par rapport à n n'est possible que par approximations successives. On se fixera un certain rapport entre la largeur occupée sur la périphérie de l'induit par un des faisceaux équidistants groupant les conducteurs actifs et le développement de l'arc qui sépare les milieux des pôles consécutifs. Une largeur des faisceaux voisine de la moitié de l'écartement des milieux des pôles combinée avec une largeur des pôles égale aux deux tiers ou à la moitié de ce dernier sont des proportions très usitées avec les induits lisses. On choisira alors, dans le tableau ci-après, concernant des champs dans l'entrefer uniformes et limités aux contours de surfaces polaires rectangulaires,

		RAPPORT DE LA LARGEUR DES FAIS- CEAUX INDUITS A L'ÉCARTEMENT DES MILIEUX DES PÔLES VOISINS.				
		0	1/3	1/2	2/3	1
RAPPORT DE LA LARGEUR DES PÔLES A L'ÉCARTE- MENT DES MILIEUX DES PÔLES VOISINS.	1	$k = 1,00$	0,88	0,82	0,745	0,58
	2/3	1,23	1,115	1,065	0,97	0,745
	1/2	1,415	1,25	1,16	1,06	0,82
	1/3	1,73	1,42			

une valeur approximative du coefficient k . D'où un nombre de conducteurs

$$n = \frac{A}{k \frac{\pi}{\rho}},$$

à l'aide duquel on pourra rechercher, par la méthode graphique, une valeur plus correcte de k , en tenant compte de la configuration réelle des surfaces polaires recouvrant l'induit et, dans la mesure du possible, de l'épanouissement du flux inducteur utile autour de celles-ci. Introduite à son tour dans la dernière formule, cette nouvelle valeur de k conduira à un nombre de conducteurs induits plus exact, au moyen duquel on répétera, s'il y a lieu, le calcul graphique précédent, mais qui, en général, pourra être adopté tel quel, s'il est divisible par p , grâce à la faible influence du nombre des fils composant les faisceaux induits sur la valeur du coefficient.

Éventuellement, on modifiera légèrement le nombre n trouvé pour en faire un multiple exact de p , attendu que les conducteurs actifs sont partagés à la périphérie de l'armature des alternateurs à pôles de noms contraires

entre un nombre de faisceaux identiques égal à celui des pôles inducteurs. La répartition des fils de ces faisceaux entre les rainures ou perforations qui leur sont affectées pourra également exiger de petites modifications de n . Les relations (E) et (H') détermineront les altérations correspondantes à faire subir, le cas échéant, au flux $\mathfrak{X}$ et à l'induction $\mathfrak{B}$.

Il est utile de remarquer, en passant, que si l'on remplace dans (G') le produit $\zeta h b$ par son expression $\frac{\mathfrak{X}}{2 \cdot \mathfrak{B}}$ tirée de (H'), il vient, après avoir substitué $V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$ à P , $\frac{E_{\text{eff}} \cdot 10^8}{k p n N}$ à $\mathfrak{X}$, et avoir effectué les réductions,

$$\frac{n I_{\text{eff}}}{\pi D} = 2,5 \frac{\eta}{k y \cos \varphi} \cdot \left[\frac{1}{1+z} \mathfrak{B} \right]^{0.6}. \quad (I')$$

Cette relation met en évidence le fait intéressant que, dans tous les alternateurs à pôles de noms contraires avec induits à noyau magnétique, auxquels convient un même coefficient k et qui satisfont aux mêmes conditions de variation relative de la tension aux bornes entre la marche à vide et en charge sur des circuits extérieurs semblables, le rapport du nombre total d'ampères-conducteurs sur l'induit à la circonférence moyenne de la partie pleine des tôles de celui-ci est constant, à induction magnétique maxima due au flux inducteur et tantième de perte par hystérésis égaux dans le corps du noyau de l'armature, quels que soient la puissance utile, le voltage efficace aux bornes, le nombre de pôles et la vitesse angulaire, c'est à dire la fréquence.

Cette propriété pourra être mise à profit pour le calcul rapide de séries d'alternateurs de même type

On vérifiera si, en donnant aux conducteurs actifs de l'armature une section appropriée au courant qu'ils transportent et un isolement en rapport avec le voltage à pro-

duire, il est possible, si le noyau doit rester lisse, de les grouper convenablement à sa surface en faisceaux équidistants de la largeur voulue, ou, s'il s'agit d'un induit cuirassé, de les loger d'une manière satisfaisante dans le nombre de canaux prévu, tout en conservant à ceux-ci des proportions acceptables qu'on arrêtera, en complétant l'épure du noyau, pour s'assurer que la perte additionnelle par hystérésis, occasionnée par la zone des rainures ou perforations ajoutée, n'est pas exagérée. L'amplitude de l'induction magnétique effective dans cette zone est sensiblement égale au quotient de $\frac{I}{1+z} \pi$ par la section de fer qui y est offerte, devant chaque pôle inducteur, au passage des lignes de force. La densité efficace moyenne du courant dans les conducteurs des induits à noyau magnétique des alternateurs est ordinairement de 3 à 4 ampères par mm². Si l'on n'arrive pas à un arrangement convenable des conducteurs, il y a lieu d'apporter aux résultats obtenus jusqu'à présent des modifications dont la relation (I') aidera la recherche.

Si l'enroulement induit n'est pas entièrement formé de même fil, on aura encore à proportionner judicieusement la section des raccords reliant les conducteurs actifs entr'eux en zigzag ou en boucles. On verra ensuite si la puissance dissipée par effet Joule n'excède pas les limites admissibles. A cet effet, on relèvera, sur le dessin, le développement des conducteurs actifs et des raccords, pour en déduire la résistance électrique de l'enroulement, en attribuant au cuivre une résistibilité de 2 microhms-cm, eu égard à l'élévation de la température de régime. On pourra tenir compte, s'il est nécessaire, de l'effet Kelvin, en multipliant la résistance, calculée comme s'il s'agissait de courants continus, par l'expression

$$1 + 0,82 f^2 s^2 10^{-6}$$

à laquelle se réduisent, pour la même résistibilité, les deux premiers termes de la série de M. Potier, transcrite plus haut. s est la section du conducteur exprimée en cm^2 ; quand elle atteint 1 cm^2 , le multiplicateur ne dépasse guère 1,001 à la fréquence 40 et 1,01 à la fréquence 120. En général, la correction sera inutile. Soit R ohms la résistance trouvée pour l'enroulement induit entre les bornes terminales. Si la puissance, $I_{\text{eff}}^2 R$ watts, qu'elle dissipe en chaleur par l'effet Joule, en pleine charge, est trop considérable, on a la ressource de majorer la section des conducteurs; dans le cas où ce moyen de correction conduirait à des densités de courant trop faibles, il serait nécessaire de retoucher les calculs en s'arrangeant de manière à réduire la longueur totale de l'enroulement.

Il faudra aussi examiner si un échauffement exagéré de l'armature n'est pas à craindre. A défaut de renseignements concernant spécialement les alternateurs, on pourra se faire une idée de l'élévation t de la température de régime de l'induit au-dessus de la température ambiante, dans les machines avec armature mobile, au moyen de la formule empirique

$$t = \frac{550 w}{\sigma (1 + 0,001 v)} \text{ degrés centigrades,}$$

convenant aux dynamos à courant continu, et dont les symboles seront interprétés comme suit : σ , surface de refroidissement de l'armature en cm^2 ; v , vitesse linéaire moyenne de celle-ci en cm par seconde et w , puissance totale, en watts, transformée en chaleur dans l'organe dont il s'agit.

On remarquera, toutefois, que l'application de cette formule aux machines à courants alternatifs semble devoir conduire plutôt à une estimation trop élevée, étant donné que le noyau des induits de celles-ci offre des surfaces

nues relativement étendues, qui abandonnent plus facilement la chaleur grâce à l'absence de revêtements isolants mauvais conducteurs du calorique.

Poser $v = 0$, pour appliquer la formule aux alternateurs à induit stationnaire, reviendrait à négliger complètement l'action refroidissante de l'air mis en mouvement par les pôles tournants et qui frappe la face de l'armature en regard de ceux-ci. Il paraît plus logique, dans ce cas, d'introduire, dans le terme en v de la parenthèse, la vitesse circonférentielle des extrémités polaires de l'inducteur rotatif et de l'affecter d'un coefficient égal au quotient de l'aire que balaye le courant d'air par celle de l'ensemble des surfaces rayonnantes.

w se compose des pertes par effet Joule dans l'enroulement électrique, par hystérésis et par courants de Foucault dans le noyau magnétique.

La première de ces pertes est $I_{eff}^2 R$; outre yP , la seconde comprend, dans le cas où les conducteurs induits sont logés dans des rainures ou perforations du noyau, la puissance absorbée par hystérésis dans la région entaillée de celui-ci; la dernière peut être évaluée grossièrement, en watts, par cm^3 de fer feuilleté, en multipliant le carré de l'induction effective maxima par l'expression

$$1,23 \cdot f^2 \epsilon^2 \cdot 10^{-11}$$

à laquelle on arrive si l'on suppose que les variations du flux magnétique suivent une loi simplement sinusoïdale et que la résistibilité du fer des tôles, d'épaisseur ϵ généralement comprise entre 0,03 et 0,07 cm, est 10 microhms-cm.

La chaleur produite par les courants de Foucault dans les conducteurs induits, et dont la prédétermination n'est guère possible par le calcul, doit être négligeable dans les machines bien conditionnées.

La température de régime de l'armature ne peut pas dépasser de plus de 35 à 45° C celle du milieu ambiant. Si l'examen faisait prévoir un échauffement anormal, on chercherait à accroître le rapport de la surface de refroidissement aux watts dissipés en chaleur. Un moyen efficace de ventilation des induits consiste à ménager, dans le paquet de tôles du noyau, quelques jours à travers lesquels la force centrifuge entretient une circulation d'air.

(*A suivre*).

(*Applaudissements.*)

M. Del Proposto, *président*, adresse les remerciements de l'Association à M. De Bast : il constate que son travail promet d'être le plus complet qu'on ait, à présent, sur le calcul des alternateurs.

M. L'Hoest, *secrétaire général*, donne lecture de son rapport annuel sur la situation de l'Association et les travaux de l'exercice 1896-1897 :

Messieurs et chers camarades,

- En conformité de l'art. 7 de nos Statuts, j'ai l'honneur de vous exposer la situation de l'Association à la fin de l'exercice écoulé et de vous rappeler les travaux accomplis pendant l'année sociale 1896-1897.

Il y a un an, nous comptons 330 sociétaires, à savoir, 15 membres honoraires, 226 effectifs, 19 associés et 70 temporaires.

Le 7 février dernier, la mort a ravi à la science une des gloires de l'Italie, le professeur Galilée Ferraris, membre honoraire de l'Association. Notre camarade M. le capitaine de Sauteiron vous a retracé, le 28 février, la carrière de cet illustre savant ; qu'il me soit permis de rappeler avec quelle sollicitude Ferraris suivait, depuis ses débuts, les travaux de notre jeune Association et comme il nous

prodiguait ses encouragements jusque dans les derniers temps de sa trop courte existence.

Cette perte a réduit à 14 le nombre de nos membres honoraires.

Par contre, la liste de nos membres effectifs a été portée à 273 par suite des dernières promotions, en sorte que nous abordons l'année sociale 1897-1898 avec 374 sociétaires. En raison de l'accroissement du nombre des membres, vous aurez donc à procéder à l'élection d'un commissaire nouveau.

* * *

Dans son discours inaugural, notre président, M. De Bast, a abordé l'étude de la construction des alternateurs, étude si ardue, si complexe, dont les éléments sont épars et présentés de manières si diverses dans la littérature technique. Rassembler et coordonner tout ce qui a été dit de valable sur la matière, combler les lacunes qu'on y rencontrait, rechercher l'origine logique de certains dogmes, de certains coefficients qui semblaient procéder de l'empirisme, telle a été l'œuvre dont notre président nous a donné les prémices en ouvrant la série de nos travaux et qu'il a poursuivie ultérieurement.

Cette importante étude n'est pas terminée ; mais en quittant le fauteuil présidentiel où, pour la troisième fois, nous l'avions appelé, M. De Bast nous en a promis la suite ; en consultant l'ordre du jour, vous pouvez constater qu'il ne tarde pas à remplir sa promesse.

MM. Van der Wallen et Mavroïdis ont entrepris la monographie du transport d'énergie par le courant biphasé. Dans ce travail très documenté, les auteurs passent en revue les différents types d'alternateurs biphasés, les moteurs qu'ils actionnent, les transformateurs qu'ils uti-

lisent et les canalisations qu'ils nécessitent. Ils terminent leur étude par l'examen critique des conditions d'emploi du courant biphasé comparé au courant continu. Nos camarades consulteront avec fruit l'important mémoire de MM. Van der Wallen et Mavroïdis, où la question de la canalisation est particulièrement traitée avec les développements qu'elle comporte.

Il est une industrie, fort peu connue dans nos contrées, qui semble être réservée aux pays dotés de grandes forces naturelles non encore utilisées ; nous voulons parler de la fabrication par l'électrolyse des alcalis et des chlorates alcalins. L'électrochimie semble appelée cependant à un grand avenir, et c'est pourquoi notre camarade M. Bayet nous a fait passer en revue tous les procédés tentés ou utilisés pour la fabrication spéciale que nous venons de désigner. Sa communication est la première dans son genre qui a été faite à notre Association, et nous sommes heureux de noter l'intérêt, bien mérité d'ailleurs, qu'elle a suscité.

A l'inverse de l'électrochimie, la traction électrique a trouvé chez nous des conférenciers nombreux et autorisés. Cette année, nous avons à signaler le mémoire de M. Van Kesteren sur la construction des lignes de tramways, dans lequel l'auteur traite, avec détails, les nombreuses particularités de ce genre d'installation.

La télégraphie sans conducteur, cette curieuse application que M. Marconi a faite de procédés et d'appareils qui ne paraissaient pas devoir quitter le laboratoire, a donné lieu à une très intéressante communication de M. Del Proposto.

Dans le domaine de la science pure, nous devons mentionner un bien remarquable mémoire de M. Colard sur l'état électrique variable, dans lequel notre camarade expose une élégante méthode de détermination des cons-

tantes d'amortissement propre d'un réseau complexe, dont il est l'auteur.

M Steels nous a décrit le block-système automatique de Hall, largement employé aux États-Unis et actuellement mis à l'essai sur une ligne belge. Comme complément à cette communication, j'ai eu l'honneur de vous présenter la description du block-système aéro-électrique Westinghouse.

Nous devons enfin à nos secrétaires-adjoints quelques notices et traductions qui ont enrichi notre chronique des nouveautés les plus saillantes.

* * *

Cette année encore, nous le constatons avec un légitime sentiment de fierté, les travaux de nos sociétaires ont seuls alimenté notre *Bulletin*. Nous espérons que malgré les sollicitations de la presse technique, nos camarades continueront à nous réserver la primeur des mémoires qu'ils veulent publier ; de notre côté, nous comprenons que notre devoir est de leur assurer le maximum d'avantages qu'ils pourraient espérer d'ailleurs.

Dans ces derniers temps, nos bulletins d'offres d'emploi se sont succédé à des intervalles très rapprochés ; nous ne doutons pas que les industriels apprécieront de plus en plus l'efficacité de ces informations pour leur assurer les collaborateurs dont ils ont besoin. Le secrétariat ne néglige rien pour donner à ce service la ponctualité et la promptitude qu'il réclame ; aux sociétaires qui sont en situation de nous signaler les emplois à conférer, nous faisons le plus pressant appel pour qu'ils nous prêtent leur assistance dans la tâche qui nous est dévolue.

(*Applaudissements.*)

M. Rutten communique à l'assemblée une note sur

**Le Régulateur astatique à valve équilibrée
« système Pilet ».**

Depuis l'existence des machines à vapeur, la question du réglage de la vitesse angulaire a toujours préoccupé les ingénieurs et les constructeurs, mais c'est surtout depuis le moment où l'utilisation des courants électriques a pris une si grande extension que tous les efforts se sont dirigés vers ce but.

Lorsqu'un moteur à vapeur a comme seul office d'actionner une dynamo pour un service régulier, nos machines perfectionnées peuvent parfaitement remplir le rôle qu'on en attend, mais lorsqu'il s'agit, comme c'est généralement le cas, de faire usage d'une même machine pour la force motrice et pour l'éclairage électrique de l'usine, il est rare de rencontrer un régulateur suffisamment sensible pour ce double emploi.

Dans ce cas, on est très embarrassé dans le choix du régulateur à adopter, étant donné que, dans la plupart des types, la pression de la vapeur exerce une influence funeste sur les mouvements communiqués à l'organe de régularisation de l'admission.

En effet, suivant les différents degrés d'ouverture, la surface offerte à la vapeur est différente, donc la résistance au déplacement est variable. Une fois cette résistance vaincue et l'appareil en mouvement, la valeur de cette résistance change.

Cette mauvaise influence se fait d'autant mieux sentir qu'il n'est pas toujours possible au chauffeur de maintenir constante la pression dans la chaudière et que, par suite, l'action de la vapeur sur l'appareil de réglage varie avec cette pression.

Pour mieux faire ressortir les désavantages résultant de l'emploi d'un tel système, considérons un régulateur ordinaire établi sur un appareil de réglage de l'admission quelconque, non équilibré et offrant par conséquent une résistance d'une certaine valeur, variable avec le degré d'ouverture.

Supposons que la résistance actuelle soit R et qu'à un moment donné, la vitesse angulaire de la machine subisse une variation faible : le régulateur, s'il est sensible, devrait suivre l'impulsion que lui donne la machine et changer sa hauteur de manchon.

Mais l'action de la force centrifuge des boules peut n'être pas suffisante pour vaincre la résistance de l'appareil de réglage et la machine conservera sa nouvelle vitesse sans que le régulateur soit capable de l'en empêcher.

La variation de vitesse angulaire devra atteindre une certaine valeur pour que le régulateur puisse vaincre la résistance qui lui est opposée.

Dans les appareils non équilibrés, qui présentent à la vapeur une surface variable, cette résistance au déplacement ne peut rester constante dans toutes les positions de la valve ; elle croît ou décroît suivant le sens du déplacement.

Appelons R la résistance de l'appareil en moyenne ouverture, nous pourrions représenter les différentes résistances par :

$$(R + n) \dots (R + 3), (R + 2), (R + 1), R, \\ (R - 1), (R - 2), (R - 3) \dots (R - n).$$

Lorsque la différence de vitesse angulaire de la machine aura donné au régulateur l'énergie suffisante pour vaincre la résistance qui lui est opposée, cette énergie sera capable de faire exécuter à cette résistance un chemin bien déterminé.

Lorsque la résistance diminue avec le déplacement, l'énergie acquise par le régulateur est trop forte, et le régulateur dépasse son but; la machine n'est donc pas réglée.

Dans le cas contraire, lorsque la résistance augmente, le régulateur ne peut achever son mouvement et le dérèglement persiste.

Il en résulte qu'une série de variations de vitesse pourra seule ramener la machine à sa marche normale, pourvu qu'une nouvelle variation de l'énergie absorbée ne se produise pas pendant ces oscillations du régulateur, ce qui viendrait encore aggraver l'irrégularité.

On voit donc que, même avec un bon régulateur sur un appareil de réglage sur les mouvements duquel la vapeur exerce une influence, le maintien d'une vitesse régulière ne peut être obtenue; peut-être constatera-t-on le même nombre de tours par minute, mais la vitesse angulaire éprouvera des fluctuations assez graves.

Ces considérations ont amené les constructeurs à rechercher un appareil de réglage de l'admission dont les mouvements soient indépendants de la pression et dont la résistance au déplacement et l'usure soient réduits au minimum.

Il y a quelques années, un mécanicien maestrichtois, M. Joseph Pilet, inventa une valve absolument équilibrée, à résistance au déplacement très-minime et dont les surfaces de frottement sont telles que l'usure est pour ainsi dire nulle.

C'est cet appareil, dont la valeur a été établie par l'expérience, que je me propose d'étudier.

La valve équilibrée « système Pilet » (fig. 1) est bien celle qui peut le mieux prétendre à la qualification d'équilibrée.

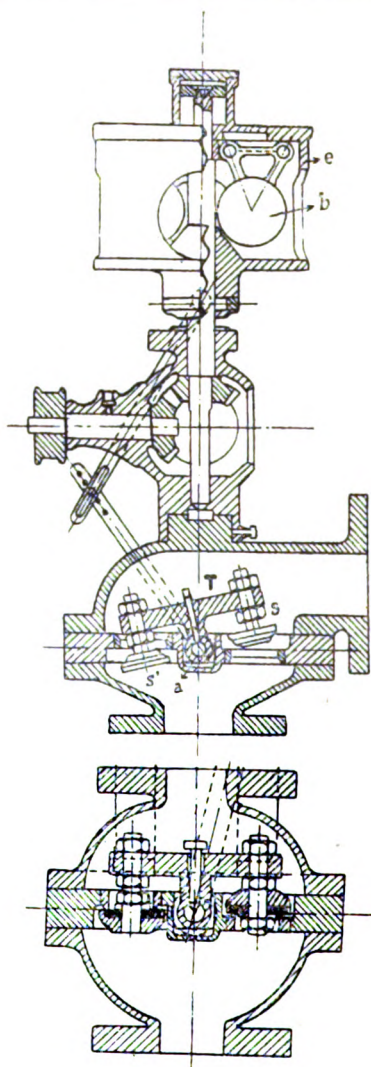


Fig. 1 et 2.

Elle consiste en un balancier en forme de T, supporté par un axe horizontal *a*, sur lequel sont boulonnées deux

soupapes s et s' , se présentant devant les deux passages de vapeur.

L'une de ces soupapes s' ferme le passage par un mouvement de bas en haut, tandis que l'autre s ferme le second passage de haut en bas.

Supposons le balancier dans la position horizontale (fig. 2), les deux soupapes reposant sur leurs sièges.

Dans ce cas, la pression de la vapeur sur la soupape s est fonction du diamètre extérieur du siège. En effet, si nous considérons (fig. 3), une soupape sur son siège, et

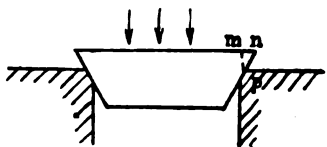


Fig. 3.

si nous envisageons la pression sur l'anneau formé par $m n p$, on voit que la pression sur la surface mn est équilibrée par celle sur np , attendu que les projections horizontales sont égales

La charge sur la soupape s' , qui agit en sens inverse, est liée par la même relation au diamètre du passage vers cette soupape.

Ces deux diamètres sont égaux, dans la valve Pilet, ainsi que les surfaces du balancier tant à droite qu'à gauche de l'axe central; la pression de la vapeur est donc sans action sur le système.

Si nous considérons maintenant (fig. 1) les soupapes levées de leurs sièges, les surfaces de pression de la vapeur sur l'ensemble, tant à droite qu'à gauche de l'axe central, sont constituées par la projection horizontale du balancier et des soupapes. Ces projections étant égales, l'équilibre existe encore dans ce cas.

On voit donc que, quelle que soit la pression de la vapeur, la valve Pilet est absolument équilibrée et indépendante de la charge dans tous les mouvements qu'on lui communique. Il n'y a d'autre résistance que le frottement de l'axe de rotation horizontal a , qui porte d'un côté dans la boîte à bourrage et de l'autre dans la plaque porte-sièges de l'appareil.

Cette résistance, étant très-minime peut être considérée comme constante.

Il est encore à remarquer que, puisqu'il y a deux passages ayant comme section totale la section d'entrée de vapeur, le chemin à parcourir par les soupapes pour obtenir la pleine ouverture est beaucoup moindre que dans n'importe quel autre appareil.

La valve répondant aux conditions de sensibilité, de résistance et d'usure minimum voulues, il s'agissait de la doter d'un régulateur approprié, capable de changer la hauteur de son manchon pour la plus petite variation possible de la vitesse angulaire.

Le choix est tombé sur un régulateur astatique à grand coefficient de sensibilité.

Le régulateur agissant sur la valve Pilet et dont le type fut créé par M. Victor Lebeau, chef du bureau d'études de la Maison Beer, de Jemeppe, est muni de 4 boules b ayant leurs pivots dans une pièce en forme de croix c .

La masse centrale est constituée par une enveloppe cylindrique c entourant les boules, évitant tout danger de heurt pendant le graissage.

Les engrenages sont également enveloppés.

Rappelons qu'un régulateur astatique ne possède qu'une seule vitesse (vitesse normale), pour laquelle le manchon reste immobile à toutes les hauteurs.

Le principe des régulateurs à force centrifuge est le suivant :

La rotation d'un système de boules à suspension libre donne lieu à un moment de force centrifuge FH qui tend à écarter celles-ci de l'axe de rotation.

À ce moment, on en oppose un autre, constitué soit par un ressort antagoniste, soit par un contrepoids Q appelé masse centrale, auquel vient s'ajouter algébriquement le moment de la résistance R de l'appareil de réglage de l'admission.

En donnant au régulateur différentes vitesses ascendantes pour les différentes hauteurs de course du manchon et égalant les moments des forces centrifuges à la somme algébrique des moments de la masse centrale et de la résistance, on obtient une série d'équations permettant d'établir une courbe des vitesses angulaires d'équilibre des boules aux différentes hauteurs de course du manchon.

Cette courbe est appelée la courbe d'équilibre du régulateur à l'ascension.

Il est à remarquer que, dans l'ascension, le moment de la résistance de la valve s'ajoute à celui de la masse centrale.

On obtiendrait de même une courbe d'équilibre du régulateur à la descente.

Dans ce dernier cas, le moment de la résistance vient en déduction du moment de la masse centrale.

Ces deux courbes sont inclinées par rapport à l'axe des ordonnées et, dans le cas d'une résistance constante, elles sont parallèles.

Dans le diagramme des courbes d'équilibre d'un régulateur astatique, la plus petite vitesse d'équilibre du régulateur à la montée est égale à la plus grande vitesse d'équilibre à la descente.

Etablissons les équations d'équilibre du régulateur,

type Lebeau, en prenant les moments par rapport à l'articulation s (fig. 4) :

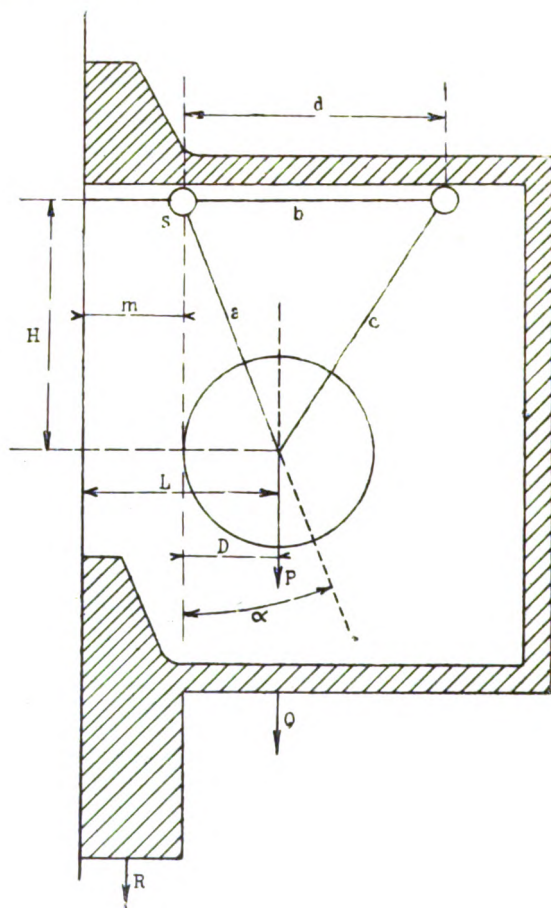


Fig. 4.

La force centrifuge

$$F = \frac{u^2}{9,81} P L = \frac{n^2}{894,5} P L$$

$$F H = \frac{n^2}{894,5} P L H,$$

ω étant la vitesse angulaire et n étant le nombre de tours par minute.

La somme algébrique des moments des forces qui lui sont opposées est :

$$P D + d (Q \pm R)$$

Donc l'équation d'équilibre est :

$$\frac{n^2}{894,5} PLH = PD + d (Q \pm R)$$

ou bien

$$n = \sqrt{894,5 \frac{PD + d (Q \pm R)}{PLH}}$$

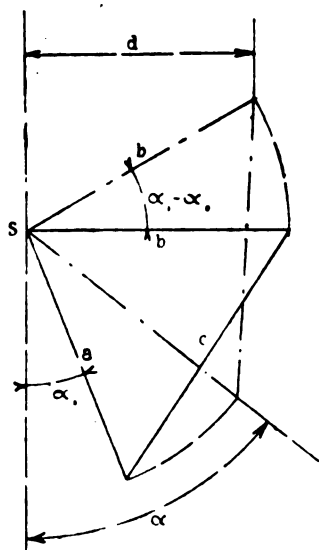


Fig. 5.

Considérons le manchon plus ou moins levé, on voit dans (fig. 4) et (fig. 5) que :

$$D = a \sin \alpha_1; L = m + D = m + a \sin \alpha_1;$$

$$H = a \cos \alpha_1; d = b \cos (\alpha_1 - \alpha_0).$$

Les équations d'équilibre du régulateur à la montée et à la descente sont donc :

$$n_1 = \sqrt{894,5 \frac{P a \sin z_1 + b \cos (z_1 - z_0) (Q + R)}{P (m + a \sin z_1) a \cos z_1}};$$

$$n_2 = \sqrt{894,5 \frac{P a \sin z_1 + b \cos (z_1 - z_0) (Q - R)}{P (m + a \sin z_1) a \cos z_1 d}}.$$

En faisant varier z , depuis la valeur de l'angle initial z_0 correspondant au point le plus bas de la course du manchon, jusque z_1 , correspondant au point le plus haut de la course, on obtient deux séries de valeurs des vitesses n , constituant les deux courbes d'équilibre du régulateur à la montée et à la descente.

Traçons deux axes coordonnés et choisissons l'axe des ordonnées comme axe des hauteurs de course du manchon, l'axe des abscisses étant celui des vitesses angulaires, soit du nombre de tours.

Le diagramme des courbes d'équilibre d'un régulateur astatique se présente comme ci-contre (fig. 6).

Lorsque la machine fait son nombre normal de tours, de même que le régulateur, celui-ci peut se maintenir à n'importe quelle hauteur de course pour la vitesse $O\Omega_1 = h_2 \omega_2$ (vitesse normale).

Supposons que le manchon du régulateur se trouve à la hauteur Oh (Oh_2 étant la course totale) et à la vitesse normale $hn = O\Omega_1 = h_2 \omega_2$, le régulateur sera dans une position stable.

Si la vitesse du régulateur augmente, il faudra qu'elle atteigne d'abord la valeur $h\Omega$ indiquée par la courbe d'équilibre à la montée, avant que la hauteur du manchon puisse varier.

Cette vitesse est-elle dépassée, par exemple de la quantité Ω_0 , le manchon montera immédiatement à la hauteur h_x et le régulateur sera de nouveau en équilibre.

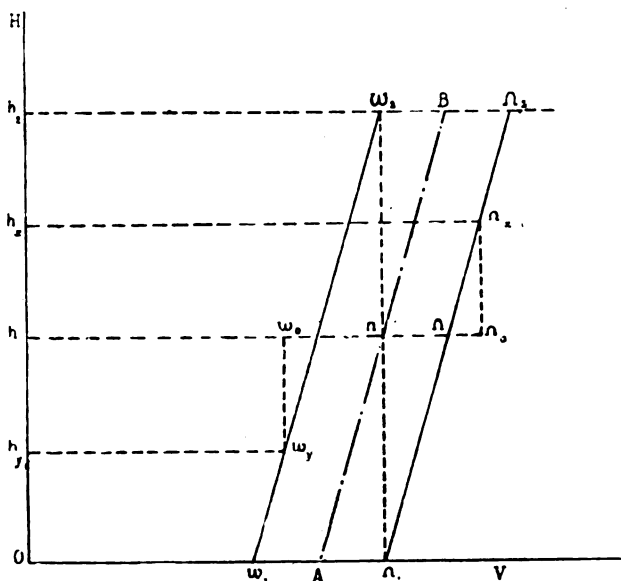


Fig. 6.

La valve se ferme donc plus ou moins pour ramener la machine à la vitesse normale.

Si la vitesse, au lieu d'augmenter, avait diminué, le régulateur n'aurait pas changé de hauteur, avant que la vitesse n'ait atteint la valeur h_{ω} .

Si la vitesse tombe à h_{ω_0} , le régulateur descendra de suite en h_y .

On voit donc que la sensibilité du régulateur est inversement proportionnelle à la différence $h_{\Omega} - h_{\omega}$, donc à l'écartement des deux courbes d'équilibre.

Lorsque ce même régulateur travaille sans résistance,

c'est-à-dire décroché de sa valve, les deux courbes d'équilibre à la montée et à la descente du régulateur (Ω_1 , Ω_2 et ω_1 , ω_2) se confondent en une seule AB, inclinée par rapport à l'axe des Y et parallèle aux deux courbes d'équilibre.

L'inclinaison de cette courbe, par rapport à l'axe des Y, dépend du principe du régulateur. Comme les deux courbes d'équilibre sont parallèles à cette courbe moyenne et que leur écartement de cette dernière dépend de la résistance de l'appareil de réglage de l'admission, il est clair qu'un régulateur quelconque ne peut travailler astatiquement sur la petite résistance de l'appareil Pilet.

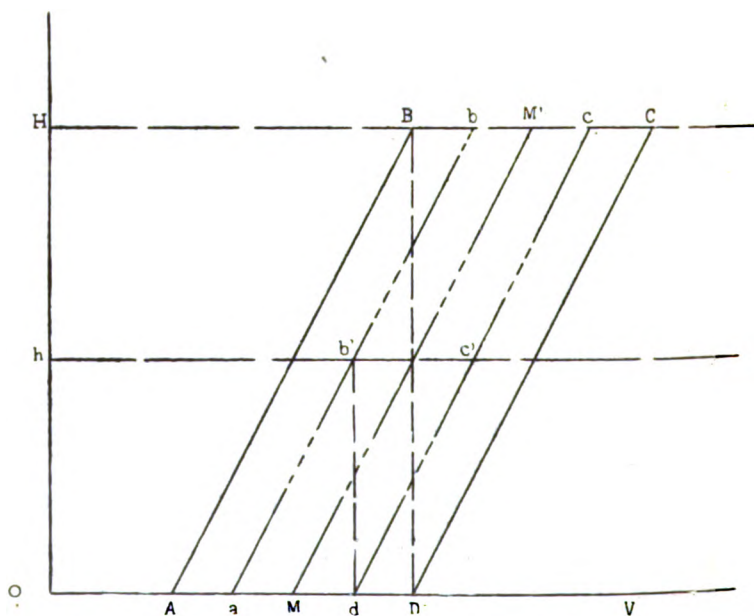


Fig. 7.

En effet, prenons un régulateur (fig. 7) travaillant astatiquement sur une résistance, pour une course déterminée

OH, nous aurons le diagramme ABCD, avec courbe moyenne MM'.

Si nous faisons travailler ce même régulateur MM' sur une résistance plus petite, nous aurons le diagramme *abcd*, qui n'est astatique que pour la course *oh*.

On voit donc que, pour avoir l'astaticité de l'appareil, il faudra relever la courbe moyenne M M' pour avoir le diagramme de la fig. 8.

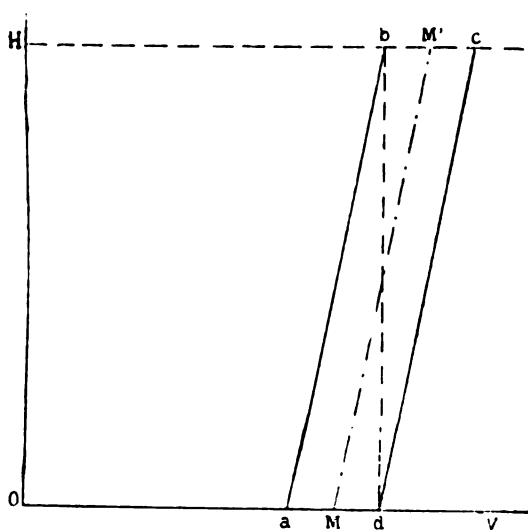


Fig. 8.

Le coefficient de sensibilité d'un régulateur astatique s'exprime par :

$$2 K = \frac{2 n}{n_2 - n_1}$$

où n représente la valeur moyenne MM', n_2 celle de la courbe d'équilibre à la montée du régulateur DC et n_1 celle de la courbe de descente BA.

Dans le système Pilet, la valeur de ce coefficient atteint 50, alors que dans les régulateurs connus, ce coefficient ne dépasse pas 42.

Il résulte des considérations précédentes que l'appareil Pilet se distingue par les qualités suivantes :

1° Sa grande sensibilité à toutes les hauteurs de course du manchon, attendu que sa résistance est constante et très-minime.

Il maintient donc la vitesse angulaire, quelque grandes que soient les variations de force, même instantanées, que subit la machine;

2° Sa solidité et sa durée. La valve n'ayant d'autres frottements que celui de l'axe supportant le balancier des soupapes, l'usure est réduite au minimum. D'ailleurs, le premier appareil, construit en 1886, fonctionne encore à l'entière satisfaction de son propriétaire, sans que jamais on ait eu à y toucher.

3° Absence de tout danger pendant le graissage, tous les organes mobiles étant sous enveloppe.

4° Economie de main-d'œuvre, l'ouvrier mécanicien n'étant plus obligé de rester constamment près de sa machine, peut être utilisé à d'autres besognes. En effet, le modérateur une fois ouvert, le régulateur se charge absolument de maintenir la vitesse constante.

(Applaudissements.)

M. Del Proposto, président. J'adresse à M. Rutten les remerciements et les félicitations de l'Assemblée pour la communication dont il vient d'être donné lecture.

L'excessive réduction de la résistance de la valve Pilet ne donnera-t-elle pas lieu à des oscillations persistantes du régulateur ?

M Rutten. Les résistances de la valve sont suffisantes dans le système Pilet pour empêcher ces oscillations, du moins, grâce à l'amortissement d'une cataracte à air qu'on a ajoutée.

Avant de se séparer, l'Assemblée procède à l'élection d'un huitième commissaire.

M. André est élu à cette fonction.

La séance est levée à une heure.

CHRONIQUE.



Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Alfred Dubois avec M^{lle} Laure Manne, et celui de notre camarade M. Georges Theunis avec M^{lle} Louise Brasseur.



Par arrêté royal du 30 décembre dernier, M. Gramme a été nommé commandeur de l'Ordre de Léopold.

A cette occasion le jury international des classes d'électricité de l'Exposition de Bruxelles 1897 a décidé, à l'unanimité de ses membres, d'organiser une manifestation solennelle en l'honneur du célèbre électricien belge. Cette manifestation, à laquelle sont conviés les électriciens du monde entier, aura lieu à Bruxelles à une date qui sera ultérieurement fixée.



SÉANCE DU 30 JANVIER 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Andrews, Aragon, Bardiaux, Batigne, Baudalet, Baudry, Bayet, Berger, Bisacco-Polozzi, Bodde, Boubnoff, Briffaux, Centonze, Cheftel, Compyn, Coops-Busgers, Cortivo, Crudenaire, De Bast, De Grimouard, Della Riccia, Del Proposto, de Meeus, de Nonancourt, Foucault, Gerard Émile, Gerard Eric, Giannuzzi, Guillaume, Guy, Henrion Albert, Henrion Marcel, Herzen, Hoogwinkel, Iakouboff, Kroll, L'Hoest, Luraschi, Manzoni, Mari, Masson, Maternowski, Maus, Melotte, Modigliani, Moens, Mugica, Nering-Bögel, Ottavi, Poggi, Polivanoff, Quinaux, Raudot, Riboni Carlo, Roussakoff, Schiesari, Schopoff, Sperk, Tart, Van den Savel, Van der Wallen, Weinstock, Wilkin, Zocchi.

M. Eric Gerard, vice-président d'honneur, au fauteuil.

M. Del Proposto, *président*, propose de reporter à une séance ultérieure l'approbation des procès-verbaux des séances des 28 novembre et 12 décembre 1897.

Il notifie la nomination, en qualité de secrétaires-adjoints, de MM. Baudry, Della Riccia, Micheels, Leguillon et Polivanoff, membres temporaires.

Il dépose sur le bureau les ouvrages suivants :

Un buon interruttore pel rocchetto di Ruhmkorff, de M. le professeur ROÏTI, membre honoraire ;

Welk systeem van electrische tractie, par notre camarade M. BAERT ;

Catalogue des Accumulateurs Tudor. — Tramways électriques.

La parole est donnée à **M. Della Riccia** pour sa communication sur

Les ondes électro-magnétiques et la télégraphie sans fil.

Messieurs ,

Si j'ose vous entretenir aujourd'hui d'un sujet qui a déjà été traité devant vous avec parfaite compétence, c'est uniquement parce que, ayant eu l'occasion d'examiner de près et pendant de longues expériences les appareils de M. Marconi, j'ai été conduit à remarquer d'importants détails, à beaucoup réfléchir sur certains phénomènes auxquels leur emploi donne lieu, et à me former quelques idées personnelles. Ces idées, qu'elles soient justes ou erronées, pourraient être, je pense, un point de départ de recherches bien utiles de la part de techniciens mieux préparés que moi.

Pour ne pas abuser de votre bienveillante attention, je ne ferai qu'ébaucher une description des appareils et une explication de leur fonctionnement — deux choses que vous connaissez déjà très-bien — ne pouvant les supprimer tout-à-fait sans me désespérer d'un noyau auquel je puisse rattacher les considérations de nature à vous intéresser davantage.

PREMIÈRE PARTIE

DESCRIPTION DU TRANSMETTEUR.

Le transmetteur de M. Marconi se compose (figure 1):
D'un accumulateur portatif,
D'une clef de fermeture ou manipulateur,
D'une bobine d'induction avec interrupteur automatique,

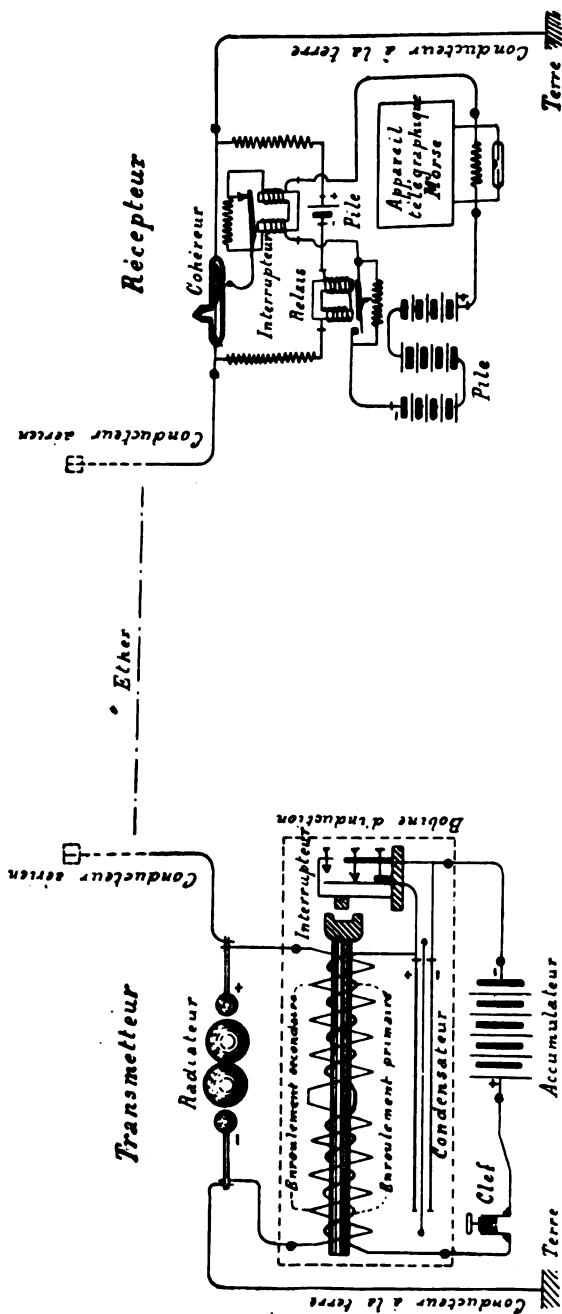


Fig. 1. — Schéma général des appareils

D'un excitateur, ou radiateur, ou oscillateur de forme spéciale,

De quelques autres accessoires.

La nature de l'accumulateur et de la clef de fermeture n'a pas d'importance. La bobine de Ruhmkorff, employée par M. Marconi pendant ses expériences à la Spezia, sortait de la maison Watson de Londres. Elle avait un noyau de 60 cm de long; elle était cloisonnée et pouvait donner, avec un courant primaire de 3 ampères, des étincelles de 25 cm entre les bornes secondaires. M. Marconi l'avait pourvue d'un interrupteur mécanique de son invention, avec lequel il pouvait obtenir des ouvertures et fermetures de courant plus espacées qu'avec un interrupteur à ressort ordinaire; et encore il réglait la position relative des pièces de cet organe de façon à le faire agir avec une remarquable lenteur.

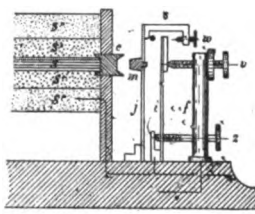


Fig. 2. — Interrupteur automatique.

J'ai dit que l'excitateur a une forme spéciale, parce que je démontrerai qu'on ne peut pas restreindre l'appellation d'excitateur, comme on l'a fait souvent jusqu'ici, exclusivement aux deux boules pleines en laiton que comporte l'appareil. Ces boules, de 10 cm de diamètre, séparées par un intervalle d'à peine $\frac{8}{10}$ de mm, ne constitueraient à elles seules qu'un oscillateur de la forme préférée par M. le professeur Righi; mais à ces deux boules M. Marconi ajoute, à un cm seulement de distance de chaque côté,

deux autres boules plus petites, portées par deux tiges en laiton, auxquelles il relie deux conducteurs complémentaires qui ont une très grande importance.

Ces deux autres boules sont creuses et n'ont que 5 cm de diamètre ; les deux tiges ont une longueur de 13 cm environ ; les quatre boules et les deux tiges sont disposées suivant une droite horizontale. Les deux boules pleines centrales sont noyées dans de l'huile de vaseline qui sert à entretenir leurs surfaces en bon état et à augmenter, comme on verra plus loin, l'énergie des décharges électriques.

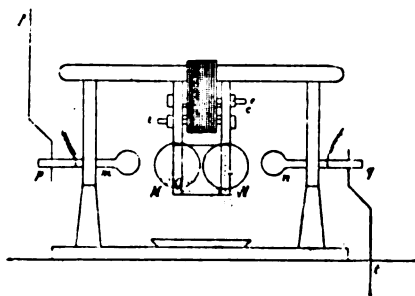


Fig. 3. — Excitateur.

C'est à tout ce système de 4 pièces, ainsi qu'aux deux conducteurs additionnels, qu'il faut étendre la dénomination d'*excitateur* dans le transmetteur de M. Marconi.

Lorsque l'on n'a d'autre but que de faire des expériences préliminaires, du genre des expériences classiques de Hertz, les deux conducteurs complémentaires que l'on attache aux deux tiges latérales consistent en deux lames minces de cuivre ayant une longueur de 40 à 50 cm sur une largeur de 2 à 3 cm. Il convient alors de déployer ces lames suivant la ligne horizontale des quatre boules. Dans ce cas, on peut aussi faire usage d'un réflecteur

cylindrique à section parabolique, que l'on dispose avec la ligne focale sur la droite des quatre boules, des deux tiges et des deux lames, et avec l'ouverture dirigée vers le récepteur, précisément comme dans les expériences classiques susdites.

Mais, avec cette disposition, on n'obtient encore qu'une distance de transmission de quelques dizaines de mètres tout au plus. Pour correspondre à des distances plus grandes, on emploie deux conducteurs additionnels différents et différemment disposés.

Le premier conducteur est un cordon de 7 fils métalliques recouvert en caoutchouc, que l'on dresse à peu près verticalement dans l'atmosphère. Il porte au bout une plaque de zinc, ayant une surface de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ de mètre carré, à une hauteur qu'on a fait varier jusqu'à la limite de 34 m.

Le second conducteur est une tresse de fils métalliques sans isolant terminée par une plaque de zinc recourbée que l'on plonge dans la mer ou que l'on enfonce dans le sol.

En dédoublant le rôle des quatre boules et des deux tiges en laiton, on peut dire que le transmetteur comprend trois circuits :

1^o Un circuit d'*alimentation* qui fournit l'énergie nécessaire à la transmission des signaux à travers l'espace : ce circuit comprend l'accumulateur, la clef, l'interrupteur mécanique, l'enroulement primaire de la bobine d'induction. (Le condensateur de cette bobine est comme toujours en dérivation par rapport à l'interrupteur.) Ce circuit est actionné au moyen de la clef; quand celle-ci est abaissée, le circuit présente encore une interruption qui est ouverte ou fermée selon la phase de l'action de l'interrupteur.

2^o Un circuit de *transformation* et de *charge* : ce circuit comprend l'enroulement secondaire de la bobine, les deux tiges avec les boules creuses, les deux boules pleines. Ce

M. N. U.

circuit est actionné par induction; il présente trois interruptions entre les quatre boules, mais ces interruptions doivent être considérées comme électriquement comblées au moment où elles sont parcourues par des étincelles, parce que les étincelles constituent des jonctions gazeuses de conductibilité suffisante.

3^e Un circuit d'*oscillation* ou d'*émission* : ce circuit comprend encore les deux boules pleines et les deux boules vides avec leurs tiges et, en outre, les deux conducteurs additionnels : le conducteur aérien et le conducteur à la terre. Ce circuit est actionné par les décharges électriques produites entre les boules par la bobine d'induction; on doit donc le considérer comme continu entre les deux tiges, mais il reste ouvert entre la plaque de zinc qui se trouve au bout du conducteur aérien et la terre.

FONCTIONNEMENT DU TRANSMETTEUR.

Quand la clef est dans sa position ordinaire, les trois circuits du transmetteur sont ouverts et tous les instruments de l'appareil sont inactifs. Si, au moyen de la clef, on ferme l'interruption principale du circuit d'alimentation, un courant dû à l'accumulateur passe et fait agir l'interrupteur. A cause de celui-ci, l'enroulement primaire de la bobine est parcouru par une série de flux électriques dont le nombre est en rapport avec celui des vibrations accomplies par la lame élastique de l'interrupteur. On sait que ces flux, tout en ayant toujours la même direction, ont continuellement une intensité variable à cause de la self-induction, de l'induction mutuelle et de la capacité des deux enroulements. Par suite, l'enroulement secondaire devient le siège d'une force électromotrice d'induction encore plus variable et changeant de sens avec une grande fréquence. Selon les expériences de Fed-

dersen et les études de Bernstein et de Mouton, la force électromotrice engendrée dans une bobine d'induction ordinaire peut présenter quelques centaines de milliers d'alternances par seconde. On sait encore que cette force électromotrice, qui est loin d'être sinusoïdale, atteint une valeur bien plus forte, quand elle a dans le secondaire une certaine direction, que la valeur qu'elle acquiert dans la direction opposée (*).

Cette force électromotrice charge les deux boules creuses de masses contraires d'électricité. Les signes des masses alternent continuellement avec la force électromotrice. La différence de potentiel entre les deux boules change aussi de signe et atteint une valeur plus grande avec un certain signe et une valeur plus petite avec le signe contraire. Les boules extérieures électrisent par influence les boules intermédiaires et, si l'on tient compte de la grandeur des deux intervalles latéraux, on doit croire qu'il n'y a pas d'autres effets toutes les fois que la force électromotrice a le signe avec lequel elle n'atteint qu'une valeur réduite. Mais quand elle a la direction à laquelle correspond sa valeur maxima, les différences de potentiel entre les quatre sphères acquièrent de telles valeurs que les boules latérales se déchargent sur les boules intermédiaires.

A cet instant, la brusque augmentation de la différence de potentiel qui existe entre ces deux boules plus grosses détermine une décharge subséquente à travers l'intervalle

(*) D'après M. Righi, il suffit d'une interruption de quelques millimètres entre les extrémités du secondaire pour écarter toutes les décharges qui se font dans une certaine direction, tandis que les décharges qui se font dans la direction opposée peuvent franchir une interruption de plusieurs décimètres.

central du système. Cette décharge, grâce aux dimensions assignées au système, est oscillatoire, d'après la théorie bien connue de W. Thomson (Lord Kelvin); il s'ensuit que chacun des 100 000 flux secondaires de la bobine, par exemple, produit une série d'*oscillations électriques* dont le nombre peut s'élever à plusieurs millions par seconde. Il se produit donc dans le circuit d'émission une succession de séries d'oscillations électriques très rapides dont la durée totale égale la durée de l'abaissement de la clef.

En conclusion, le transmetteur n'opère qu'une double transformation: une première transformation des quelques dizaines de flux électriques primaires déterminés par le jeu de l'interrupteur en quelques dizaines de milliers de flux électriques secondaires engendrés par la bobine; et une seconde transformation de ceux-ci en quelques millions d'oscillations électriques qui se manifestent le long de l'excitateur.

Cette seconde transformation peut être comparée à la transformation de mouvement oscillatoire que l'on voit s'effectuer quand on frappe avec un trembleur aux vibrations espacées un timbre à la note très aiguë.

DESCRIPTION DU RÉCEPTEUR.

Le récepteur de M. Marconi se compose (figure 1):

d'un *coherer* de construction spéciale;

d'un élément de pile séparé;

d'un relais;

d'une pile de douze éléments;

d'un électro-aimant interrupteur;

d'une machine télégraphique Morse ordinaire;

de quelques autres accessoires.

Tous les éléments de pile employés par M. Marconi

sont des éléments secs, du type Leclanché, de la *General Electric Company*, petit modèle. Le relais sort des ateliers du Post-Office de Londres ; c'est un instrument excessivement sensible.

Le coherer, étudié à dessein par M. Marconi, est un petit tube de verre fermé, d'une longueur de 4 cm et d'un diamètre de 3 mm environ, dans lequel se trouve légèrement comprimée, entre deux petits cylindres d'argent, de calibre égal à celui du tube, une couche de limaille d'argent et de nickel, d'une épaisseur d'un millimètre environ. Cette poudre n'est ni trop fine, ni trop grosse. Les cylindres d'argent communiquent électriquement avec l'extérieur au moyen de deux fils de platine soudés à leurs bouts latéraux. Dans le tube, on fait un vide partiel jusqu'à obtenir une pression de 10 cm de mercure. Ce vide se fait au moyen d'une pompe à mercure dont on réchauffe, vers la fin de l'opération, le métal liquide afin d'enrichir l'air restant dans le tube d'une certaine quantité de vapeur de mercure.

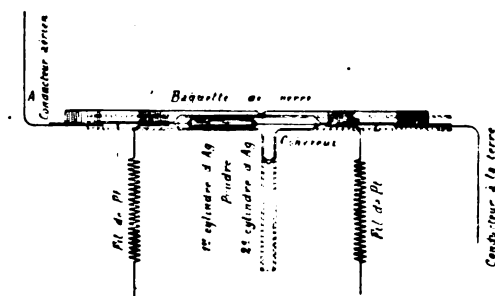


Fig. 4. — Coherer.

Je pense d'ailleurs que ces dernières opérations, et en particulier la formation du vide partiel, ne sont pas très nécessaires. L'électro-aimant interrupteur n'est qu'un électro-aimant à trembleur comme celui d'une sonnerie

ordinaire. L'armature oscillante porte un petit marteau destiné à frapper de légers coups sur le coherer. L'interrompteur est placé pour cela sur un petit plan incliné qui lui permet de s'adapter à la position du coherer après chaque mise en place ou échange de celui-ci.

Les organes additionnels principaux du récepteur correspondent tout-à-fait aux organes additionnels du transmetteur. Ce sont donc ou deux lames minces de cuivre de 40 à 50 cm de long sur 2 à 3 cm de large, ou bien un conducteur aérien isolé et pourvu d'une plaque de zinc et un conducteur à la terre.

Les deux lames en cuivre se disposent horizontalement comme deux prolongements latéraux du coherer. Dans le cas où l'on adapte un projecteur parabolique au transmetteur, on en ajoute un aussi au récepteur, de façon que les deux plans de symétrie coïncident à peu près, et que les deux droites focales soient à peu près parallèles. Les deux conducteurs aérien et à la terre, au contraire, sont disposés verticalement. On a donné au premier jusqu'à 28 m de hauteur. C'est le système du coherer et des deux conducteurs additionnels qui reçoit la dénomination de *résonateur* dans le récepteur de M. Marconi.

Mais le récepteur a encore d'autres compléments qui ne manquent pas de quelque importance: ce sont des résistances sans induction formées par de petites bobines avec enroulement en double ou par de petits volta-mètres clos.

En dédoublant le rôle du coherer, on peut dire que le récepteur, comme le transmetteur, comprend trois circuits:

1° Un circuit de *résonance* ou de *réception*: ce circuit est actionné par induction à grande distance. Il comprend le coherer et les deux conducteurs complémentaires. A cause de la sensibilité particulière du coherer — qui

consiste en une ample variation de sa résistance ohmique — on doit considérer ce circuit comme interrompu ou comme fermé là où se trouve la limaille métallique, selon qu'il ne subit aucune action ou qu'il est frappé, pour ainsi dire, par des perturbations électromagnétiques, c'est-à-dire, selon que le transmetteur est à l'état de repos ou qu'il fonctionne. Ce circuit est cependant toujours ouvert entre les deux bouts des deux conducteurs additionnels.

2° Un circuit de *secours* : ce circuit comprend encore le coherer, deux résistances additionnelles, un élément de pile et l'enroulement du relais. Il est pratiquement ouvert ou bien fermé en même temps que le précédent, à l'emplacement de la limaille métallique.

3° Un circuit d'*enregistrement* : ce circuit comprend l'armature et le buttoir du relais, la pile de 12 éléments, l'enroulement et le trembleur de l'interrupteur, la machine télégraphique Morse. Des résistances non inductives se trouvent placées en dérivation entre l'armature et le buttoir du relais et entre les mêmes organes du trembleur. D'autres résistances semblables (et parmi celles-ci M. Marconi place les résistances à liquide indiquées plus haut) sont insérées entre les bornes de l'appareil télégraphique ordinaire. Ce dernier circuit est ouvert si le relais est dans la position de repos. Pendant le fonctionnement du récepteur, ce même circuit est fermé quand les armatures du relais et de l'interrupteur touchent leur buttoir respectif ; il est ouvert quand dans l'un quelconque de ces instruments l'armature est détachée de son buttoir.

FONCTIONNEMENT DU RÉCEPTEUR.

J'ai déjà comparé la production des oscillations électriques au moyen de décharges, à la production d'un son élevé dans la gamme acoustique au moyen d'un marteau

vibrant, frappant un timbre ou un diapason. On sait que les vibrations du timbre excitent à leur tour les oscillations longitudinales de l'air environnant, qui représentent une forme différente de mouvement vibratoire dans les corps matériels. Or, les oscillations électriques qui parcourent un excitateur engendrent de même, dans l'éther physique environnant, des oscillations électro-magnétiques. Mais la comparaison peut s'étendre davantage. Ces oscillations électro-magnétiques se propagent en envahissant continuellement une région plus grande de l'espace et en s'affaiblissant en même temps, analogiquement à ce qui arrive pour les vibrations sonores dans l'air, quoique les deux vitesses de propagation soient très différentes et quoique les lois de cette propagation ne soient pas tout-à-fait les mêmes dans les deux cas. En outre, de même que les vibrations de l'air peuvent à leur tour réengendrer des vibrations dans des solides convenablement organisés qu'on nomme résonateurs, les radiations électro-magnétiques qui parcourent l'éther peuvent de nouveau produire des oscillations électriques dans des conducteurs convenablement proportionnés, auxquels on donne aussi, pour cela, le nom de résonateurs.

Ayant l'intention de revenir tantôt sur ces transformations d'énergie, je me borne pour le moment à ces indications sommaires et j'aborde le fonctionnement du récepteur.

Tandis que le transmetteur comprend les dispositions nécessaires pour engendrer des oscillations électriques primaires ou inductrices d'une durée arbitraire — la durée de la fermeture de la clef — le récepteur comprend les dispositions nécessaires pour devenir le siège d'oscillations électriques secondaires ou induites et pour enregistrer la durée de celles-ci. (Les deux séries d'oscillations n'ont pas de différence de durée appréciable.)

C'est le circuit de résonance qui est le siège des mouvements électriques périodiques induits.

Ces flux électriques alternatifs ont la propriété de réduire à quelques centaines d'ohms à peine la résistance de la limaille métallique qui se trouve dans le coherer, résistance qui s'élève ordinairement à la valeur de quelques milliers d'ohms. Aussitôt que cette augmentation de conductibilité se produit, le courant de la pile qui se trouve dans le circuit de secours peut devenir suffisant pour faire fonctionner le relais.

M. Marconi introduit dans ce circuit des boudins de fils de manganine afin de noyer la self-induction des bobines du relais dans une forte résistance ohmique. La constante de temps du circuit est ainsi diminuée, et on n'a plus à craindre que les extra-courants d'ouverture du circuit de secours ne sensibilisent le coherer à un moment inopportun. Ces résistances additionnelles servent aussi à affaiblir le courant de la pile, car un courant trop fort diminuerait la sensibilité du coherer, et à diminuer les dérivations des oscillations électriques induites dans le résonateur en dehors du coherer même.

Le fonctionnement du relais ferme le second circuit local. Alors la pile de 12 éléments envoie un courant dans l'appareil Morse d'enregistrement des signaux et dans l'électro-aimant interrupteur. Le trembleur gouverné par cet électro-aimant donne en même temps une légère secousse au coherer, ou plusieurs, si la première n'obtient pas l'effet voulu.

Si, pendant le déplacement successif des armatures du relais et de l'interrupteur, les oscillations électriques induites s'éteignaient dans le circuit de réception, la limaille du tube sensible, désagrégée par cette secousse, reprendrait définitivement la résistance primitive et le tout reviendrait à l'état initial, après que la machine télé-

graphique aurait eu à peine le temps d'imprimer un point bien court. Mais si les oscillations continuent de se produire dans le résonateur, la conductibilité de la poudre, interrompue un seul instant, est immédiatement rétablie par ces oscillations et le relais, l'interrupteur et la machine continuent à fonctionner. Ce fonctionnement dure ainsi autant que la fermeture de la clef du transmetteur. On comprend que si le coherer est suffisamment sensible, les armatures du relais et de l'interrupteur vibrent à l'unisson, parce que c'est l'action du relais qui fait fonctionner l'interrupteur et l'action de l'interrupteur qui fait cesser le fonctionnement du relais. Mais l'armature de l'appareil enregistreur Morse ne vibre pas comme les deux autres, à cause de sa plus grande inertie ; les attractions très fréquentes vers son électro-aimant la maintiennent dans une même position pendant tout le temps que des oscillations induites parcourent le circuit de réception ; elle fait donc imprimer des traits d'une longueur en rapport avec la durée des fermetures de la clef du transmetteur.

La nécessité de ne lancer que des courants excessivement faibles dans le coherer explique le besoin d'avoir deux circuits locaux, et de placer sur le premier de ceux-ci un relais d'une sensibilité exceptionnelle.

Quant aux résistances non inductives dont il a été question, elles sont placées en parallèle avec les bobines du relais, de la machine Morse et de l'interrupteur et servent à amoindrir les extra-courants qui pourraient sensibiliser le coherer et déranger la correspondance.

COMMENT SE PRODUISENT LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES DANS L'EXCITATEUR.

Le rapprochement des phénomènes électriques aux phénomènes acoustiques, dont je viens de me servir pour donner un aperçu du fonctionnement des appareils télé-

graphiques Marconi, est tout à fait insuffisant pour rendre compte de bien des circonstances qui présentent un certain intérêt et que je me propose d'éclaircir.

Comme je ne veux nullement me servir ici de l'analyse, je devrai recourir à quelque comparaison plus concrète. A cette fin, après plusieurs tentatives, j'ai imaginé un *mécanisme* particulier qui me semble propre à *représenter* suffisamment bien le phénomène à étudier. Toutefois, comme

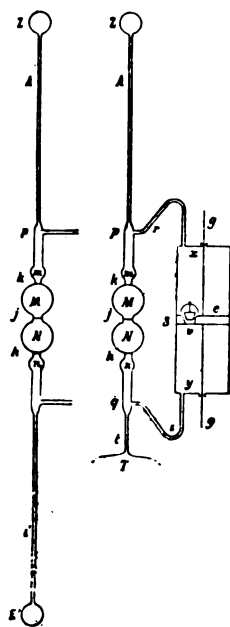


Fig. 5. — Image de l'excitateur.

on ne peut pas prétendre qu'un phénomène hydraulique, acoustique ou thermique représente exactement, ni complètement un phénomène électrique, il arrive que, dans le cas présent aussi, le mécanisme imaginé explique certaines circonstances et en néglige d'autres. C'est pour-

quoi il me faudra le modifier tour à tour pour en augmenter la faculté représentative selon le besoin.

Que l'on suppose donc un cylindre S , rempli d'un fluide *élastique et sans viscosité*, dans lequel on peut faire glisser, au moyen d'une tige g , un piston e , portant une soupape v , celle-ci ne permettant pas de produire une différence de pression aussi grande quand on pousse le piston de x vers y que quand on le pousse de y vers x .

Le cylindre sera l'image de l'enroulement secondaire de la bobine d'induction ; l'action du piston représentera la force électromotrice induite ; la différence de pression entre les deux cavités x et y tiendra la place de la différence de potentiel aux bornes.

La résistance du secondaire pourra être représentée par les frottements qui s'opposeront au mouvement dans deux tubes r et s , reliant les deux cavités du cylindre avec l'appareil destiné à représenter l'excitateur. Cet appareil sera, par exemple, un gros tube en verre, avec plusieurs renflements en forme de boules, séparés par des membranes ou diaphragmes élastiques. Deux grosses cavités sphériques intermédiaires M et N , représenteront les deux boules pleines, et deux petites cavités sphériques latérales m et n , les deux boules creuses de l'oscillateur. Les deux couches d'air latérales seront représentées par deux membranes peu élastiques et d'une certaine épaisseur ; la couche d'huile de vaseline du milieu sera représentée par une membrane plus élastique et très mince. Le système se prolonge des deux côtés en deux tubes (de verre, si l'on veut) A et t un peu plus étroits, qui représenteront le conducteur aérien et le conducteur à la terre. Ces tubes se terminent en deux cavités Z et T , la première de petite et la seconde de grande capacité, qui représenteront respectivement la plaque en zinc et la terre.

Pour avancer pas à pas, je négligerai tout d'abord cette différence de capacité en supposant le système symétrique des deux côtés de l'étranglement du milieu.

Tout le système est rempli, comme le cylindre, par un fluide élastique et non visqueux, à pression initialement uniforme.

Les choses étant ainsi, que l'on pousse le piston e de x vers y . On produira alors une compression (potentiel plus élevé) en $y n t$ et une dépression (potentiel plus bas) en $x m A$. Ces variations de pression seront transmises en partie des récipients n et m aux récipients N et M ; mais une différence de pression existera toujours entre chaque petite cavité et la grosse cavité d'à côté, supportée par l'effort des deux membranes latérales qui fléchissent et se tendent. En outre, la pression en N , plus grande qu'en M , tendra la membrane j .

Mais le jeu de la valve v ne permettant pas une excessive différence de pression entre les cavités y et x , l'action du piston (force électromotrice) se bornera à la production de ces différences de pression (différence de potentiel) entre les cavités (conducteurs) et des différentes tensions élastiques (tensions électriques) des membranes (diélectriques), actions qui découlent toutes d'un déplacement progressif du fluide élastique (électricité) dans l'intérieur de l'appareil.

Si l'on pousse ensuite le piston e de y vers x , on produit nécessairement dans le système les mêmes effets mécaniques distribués en sens contraire; sauf que toute différence de pression entre les récipients est maintenant plus accentuée que dans le cas précédent, par le fait que le jeu de la valve v n'entraîne cette fois aucune perte de l'effet utile du piston e .

Dans le cas présent, la pression décroît de m vers n ; de beaucoup entre m et M , ainsi qu'entre N et n (à cause de la grande résistance des membranes k et h qui sont assez épaisses), de peu entre M et N (à cause de la souplesse de la membrane j qui est assez mince).

Chaque détail est ainsi calculé que, dans cette seconde course du piston c , qui est plus efficace que la première, les différences de pression entre m et M et entre N et n s'élèvent suffisamment pour produire le déchirement des membranes k et h (étincelles latérales), de façon qu'une partie du fluide se transporte violemment (décharges) de certaines cavités en d'autres. Immédiatement, presque toute la différence de pression produite par le piston entre les cavités extrêmes est reportée entre les cavités sphériques intermédiaires, qui sont séparées par une membrane incapable de la soutenir. Partant, cette membrane se déchire à son tour (étincelle centrale), et permet l'irruption du fluide comprimé en mM dans le fluide raréfié en Nn (nouvelle décharge). Mais les chemins frayés au travers des diaphragmes (conductance des étincelles), doivent être supposés assez aisés; c'est pourquoi le fluide se transporte de m vers n avec une sensible force vive, de manière qu'il ne peut pas s'arrêter dès que la différence de pression entre les parties extrêmes du tube a disparu, mais qu'il continue à se mouvoir en produisant, à présent, une condensation en n et une raréfaction en m , jusqu'à ce que toute vitesse dans le sens $m n$ ait été éteinte. — A ce point, la nouvelle différence de pression, contraire à la précédente, refoule le fluide sur le chemin parcouru, avec une vitesse croissant d'abord jusqu'à un nouvel équilibre de pression et décroissant ensuite jusqu'à ce qu'un nouveau déséquilibre refoule le fluide en sens contraire. Il s'établit donc ainsi une série d'oscillations du fluide le long du tube (oscillations élec-

triques le long de l'excitateur), due à une transformation périodique de l'énergie cinétique en énergie statique et de l'énergie statique en énergie cinétique, comme dans les vibrations élastiques ou dans tout autre mouvement pendulaire.

Comme l'on voit, ces oscillations, entretenues par l'inertie, ont une période propre qui n'a rien à voir avec la période du mouvement du piston (courant induit dans l'enroulement secondaire de la bobine), qui ne fait que leur donner lieu. En général, ces oscillations ne se bornent pas à parcourir la seule portion pq du tube, et beaucoup moins elles se limitent aux boules M et N , mais elles envahissent encore les appendices A et t . Rien n'empêche, en effet, que la pression et la vitesse du fluide varient aux points p et q , comme résultat du mouvement qui s'accomplit entre ces points. Ce mouvement peut donc se propager en dehors de ces points. Je reviendrai plus tard sur cette assertion. Toutefois, ce même mouvement oscillatoire n'envahit pas sensiblement les cavités y et x du cylindre (spirale secondaire de la bobine d'induction), et cela à cause des grands frottements opposés par les tubes quasi-capillaires r et s (résistance et induction propre de cette spirale).

Une chose qu'on ne peut pas exclure *a priori* — à cause de la non-viscosité supposée au fluide — c'est qu'il puisse s'établir dans le tube à section fortement variable et dans le sein même du courant oscillatoire principal, d'autres courants oscillatoires secondaires, parcourant tout le tube ou une fraction seulement de celui-ci (entre deux étranglements), avec un rythme plus rapide, par un phénomène pareil à celui qui fait qu'un tuyau d'orgue émet quelquefois plusieurs notes harmoniques avec sa note fondamentale.

Si l'on suppose que le système est symétrique des deux côtés de l'étranglement du milieu, c'est-à-dire que

les deux tubes extrêmes A et A' ont égale longueur et se terminent par deux récipients égaux Z et Z' dont les capacités ne sont pas grandes, on voit que les oscillations donneront lieu à des conditions alternatives symétriquement distribuées le long de l'excitateur. On aura près des extrémités Z et Z' les plus grandes variations de pression et les plus petites vitesses de flux, parce que le fluide ne peut pas franchir les parois terminales ; on aura donc près de celles-ci les *nauds* des oscillations. Au point central j , au contraire, on aura les plus petites variations de pression et les plus grandes vitesses du flux, parce que c'est là que, quand les membranes sont déchirées, le fluide élastique trouve le moins d'obstacle à son déplacement longitudinal ; ce point est donc le *ventre* des oscillations.

Des circonstances tout-à-fait semblables se produiraient aussi si l'oscillateur manquait des deux appendices A et t . La dissymétrie de l'appareil, quand on lui ajoute ces deux appendices, qui en réalité sont assez différents, n'altère pas substantiellement le phénomène, mais réussit peut-être à déplacer un peu la disposition des points caractéristiques sus-indiqués. En effet, contrairement à ce qui arrive dans la cavité Z , qui n'a qu'une petite capacité, près de l'embouchure du tube t dans le récipient T , qui a une capacité bien plus grande, la pression ne pourra plus varier notablement, tandis qu'il pourra y avoir un grand mouvement du fluide. (Qu'on remarque que la terre, tout en se maintenant à un potentiel invariable, peut toujours fournir n'importe quelle masse d'électricité.) Il pourra donc y avoir un déplacement du ventre de l'oscillation du point j vers le récipient T . L'excitateur pourrait, dans ce cas, être comparé à un tube sonore, fermé à l'extrémité Z , ouvert à l'extrémité T , et actionné par un mécanisme placé en j .

Pour un système excitateur donné, qu'il soit symé-

trique ou non, les positions des nœuds et des ventres des oscillations principales, aussi bien que ceux des oscillations secondaires, s'il en existe, sont invariables ; l'on dit partant que le mouvement oscillatoire du fluide le long du tube se fait par *ondes stationnaires*. Si tous les points caractéristiques étaient équidistants (ce qui n'arrive peut-être pas dans l'oscillateur à cause de la variabilité de la section), on pourrait appeler *longueur d'onde*, comme en acoustique, le quadruple de la distance qui sépare un nœud et un ventre consécutifs.

La fréquence ou le rythme des oscillations dépend naturellement des frottements (résistance ohmique) présentés par le tube et dont la plus grande partie est due aux membranes déchirées (étincelles à travers le diélectrique), et dépend aussi des capacités volumétriques (capacités électrostatiques) des différentes cavités. Mais, dans le phénomène réel, il y a une circonstance de plus que dans le phénomène-image tel qu'il a été exposé jusqu'à présent : les oscillations électriques qui naissent dans le conducteur engendrent des oscillations de nature différente dans le milieu ambiant ; elles doivent donc mettre en mouvement des parties douées d'inertie ; celles-ci ne peuvent manquer de réagir sur les oscillations électriques mêmes, comme une nouvelle résistance (induction propre) qui dépend essentiellement de la forme du système et de la nature des corps environnants.

Dans les appareils électriques que l'on nomme excitateurs ou radiateurs, ces trois éléments — résistance, capacité, self-induction — sont ordinairement réglés de façon que les oscillations acquièrent une très haute fréquence, jusqu'à présenter des milliards d'alternances par seconde.

Il est évident que les frottements, les changements de section (et l'inertie dans un mécanisme plus complet)

empêcheraient les oscillations du fluide élastique, dans le phénomène représentatif, de se prolonger trop longtemps. Également, les trois éléments sus-indiqués, et le premier en particulier, déterminent un amortissement des oscillations électriques.

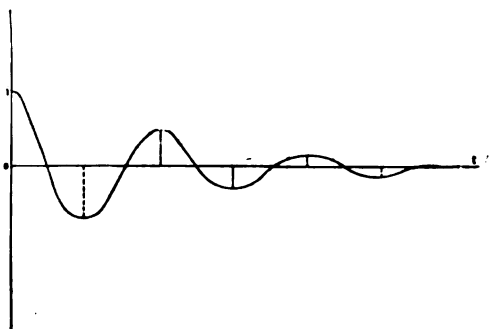


Fig. 6. — Oscillations amorties.

On doit donc supposer que, dans le mécanisme représentatif, les oscillations du fluide s'éteignent peu après que le piston e est arrivé dans la position extrême x . Après cette extinction, il faut supposer que les membranes déchirées se referment d'elles mêmes, pour représenter le rétablissement de la résistance ohmique quand les étincelles cessent de se produire entre les boules.

La durée de chaque série d'oscillations décroissantes du fluide est donc assez courte; mais comme le phénomène se renouvelle à chaque course complète du piston, et que cette course est très-rapide, les intervalles de temps pendant lesquels le fluide cède à l'action du piston sans osciller sont aussi très-courts. De la même manière la durée d'une *décharge électrique oscillante* est très-courte à cause de la promptitude de l'amortissement; mais les décharges se succédant à très bref délai, l'ébranlement électrique est à peu près continu.

ACTION SUR LE MILIEU ENVIRONNANT.

On peut à présent modifier le mécanisme-image de l'excitateur décrit plus haut, de manière à se rendre compte, jusqu'à un certain point, de son action sur le milieu qui l'entoure, et à permettre des déductions plus compliquées.

Que l'on suppose donc que les différentes cavités qui constituent l'oscillateur-image ne soient pas limitées par les parois d'un tube résistant de petite épaisseur, mais qu'elles soient creusées dans une masse indéfinie de gelée et revêtues, si l'on veut, par une pellicule immobile et indéformable, mais perméable aussi bien au fluide extérieur qu'à la gelée. On fait ainsi disparaître dans le mécanisme-image la nécessité de membranes pour séparer les cavités, leur rôle pouvant être repris par le milieu environnant qui peut être hétérogène si l'on veut. De même, il n'est plus nécessaire de supposer compressible le fluide intérieur.

La gelée doit maintenant représenter ce milieu extrêmement subtil que l'on suppose envahir tous les corps et qui s'appelle *éther*, avec les qualités spéciales qu'il faut lui attribuer lorsqu'il se trouve dans les corps transparents à la lumière et dans les diélectriques.

Ce milieu, comme on croit désormais qu'on doit l'imaginer, c'est-à-dire extrêmement plus léger que n'importe quel gaz, infiniment moins compressible que n'importe quel liquide et jouissant d'une certaine cohérence comme un solide, possède une élasticité de nature toute spéciale.

Son invariabilité de volume exclut qu'il puisse accomplir des vibrations pareilles à celles de l'air dans les tubes sonores, parce que celles-ci constituent un mouvement longitudinal qui exige des raréfactions et des condensa-

tions. L'éther manque donc d'élasticité longitudinale ou de volume.

Sa cohérence lui permet au contraire d'accomplir des vibrations semblables à celles des cordes tendues et des lames élastiques ; mais le mouvement transversal de ces vibrations ne se propage qu'en vertu de la seule résistance au cisaillement (non pas à la tension ou à la compression). L'éther a donc seulement une *élasticité transversale*

On doit en outre supposer que la valeur de l'élasticité de l'éther, ou bien la valeur de sa densité, est différente dans les différents corps. Mais cette circonstance n'est pas en contradiction avec son incompressibilité, puisqu'elle peut être attribuée à une allotropie multiple, sans parler encore des explications qu'on pourrait en donner dans une théorie tourbillonnaire, car quelques-uns des caractères de l'éther peuvent être dus à des conditions cinétiques intimes plutôt qu'à des propriétés statiques. D'ailleurs, certains caractères de l'éther ne semblent contradictoires qu'à cause du manque de corps matériels qui les réunissent. Quoi qu'il en soit, il suffit pour le but en vue de se représenter l'éther comme un corps incompressible et tremblotant à l'instar de la gelée, de la colle, de la poix, etc.

Que l'on suppose donc que la pression croisse en m et décroisse en n . Alors une certaine quantité de fluide comprimé, traversera la pellicule indéformable, mais perméable, qui limite la cavité m et ira prendre la place d'une mince couche de gelée qui sera déplacée en dehors (électricité positive). En même temps, une certaine quantité de gelée sera appelée, au travers de la pellicule qui limite la cavité n , à prendre la place d'une mince couche du fluide contracté qui sera déplacée en dedans (électricité négative). On a donc un *déplacement* de la gelée le long de certaines lignes de flux, contenues dans les plans méridiens

du système auquel on suppose une forme de révolution. Ces lignes partent normalement de la surface de la cavité m et arrivent normalement à la surface de la cavité n .

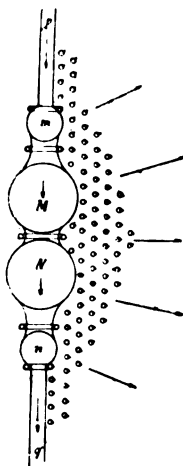


Fig. 7. — Tourbillonnement magnétique.

Mais une certaine portion de la gelée est refoulée de la cavité m vers la cavité M , et une autre portion est aspirée de la cavité N vers la cavité n . Ces actions déterminent un flux de la gelée de la cavité M vers la cavité N . En conséquence, les deux pellicules qui limitent les cavités intermédiaires sont traversées d'un côté par une certaine quantité de gelée qui y pénètre (électricité négative) et de l'autre par une certaine quantité de fluide qui en sort (électricité positive). Le déplacement de la gelée a donc lieu aussi le long d'autres lignes de flux qui parcourent les trois couches du milieu, comprises entre les quatre cavités, avec une allure analogue à celle des lignes de flux considérées d'abord. On peut dire aussi, si l'on veut, que, dans la région centrale, les lignes de flux de la gelée sont partagées en trois branches par les deux cavités intermédiaires.

Ce déplacement de la gelée peut donc représenter le fait hypothétique que Maxwell nomme *déplacement électrique dans le diélectrique*. Ce qui vient d'être exposé représente donc un phénomène *d'induction électro-statique*, et, dans ce cas, la gelée représente, à vrai dire, une partie du *fluide inducteur* de Maxwell plutôt que l'éther physique.

On peut supposer à présent que ce sont les trois couches de gelée qui se déchirent à l'instar des trois membranes *k, j, h* de tantôt. On aura encore un mouvement pendulaire du fluide le long de l'axe du système, et, dans chaque section transversale de celui-ci, il se produira une variation périodique de pression qui repoussera en dehors des pellicules une certaine quantité de fluide et qui rappellera en dedans des pellicules une certaine quantité de gelée, alternativement. Toute la masse de la gelée oscillera donc le long des lignes de flux déjà considérées.

Quant à l'huile de vaseline, on peut la représenter par une couche de gelée plus compacte que la masse de gelée qui se trouve tout autour. Alors, malgré la continuité volumétrique du déplacement, on a au centre du système un déplacement pondéralement plus intense, qui correspond à un surcroît de la charge. Ceci permet d'augmenter l'énergie de la décharge

Que l'on remarque pourtant que cette substitution d'une substance de résistibilité plus grande que celle de l'air, n'augmente pas la résistance au passage de l'électricité *pendant* les oscillations, parce qu'alors l'obstacle qui s'oppose à ce passage est la résistance *propre* des étincelles, le long desquelles le diélectrique est momentanément supprimé.

Pendant la première oscillation de la décharge, les variations de pression ont lieu d'abord sur les quatre boules, tout près des six pôles en regard, et elles se

propagent ensuite vers les lignes équatoriales des deux boules pleines — où elles arrivent bientôt — et vers les extrémités du système tout entier — où elles parviennent plus tard. Le mouvement de la gelée commence donc sur l'axe du système et s'étend des lignes de flux partagées en trois branches, aux lignes de flux continues, en envahissant continuellement une plus grande étendue du milieu.

Si l'on considère le système des lignes de flux sortant d'un petit contour fermé, tracé arbitrairement sur la surface d'une des cavités, on voit qu'il forme la surface latérale d'un tube idéal, dans lequel la gelée se déplace, en obéissant à la *loi solénoïdale* ou de *continuité*. Or, comme il est intuitif que la section de chaque tube doit croître en s'éloignant de la cavité, on comprend aussi que l'amplitude du déplacement de la gelée diminue avec l'accroissement de la distance à l'axe de figure du système.

On peut encore voir, par un autre effort d'imagination, comment le déplacement peut ne pas être la seule action que ressent le milieu pendant les décharges oscillantes.

Si l'on suppose que le fluide mis en mouvement le long du système des cavités présente quelque adhérence avec la gelée (même à travers les pellicules), on voit que cette gelée peut-être dérangée par le mouvement même du fluide, en plus que par les variations de pression produites par ce flux.

Tout le monde sait que si l'on déplace longitudinalement une corde dans l'eau, l'adhérence entre la corde et l'eau entraîne celle-ci et engendre des tourbillons ou vortex, c'est-à-dire des anneaux liquides qui entourent la corde et dont la masse possède un mouvement de rotation autour d'une certaine ligne moyenne, fermée.

On a d'autres exemples de vortex ou de tourbillons

dans les anneaux de fumée qui sortent quelquefois de la bouche des canons et de la bouche des fumeurs. C'est alors un jet de gaz ou d'air axial qui détermine le mouvement tourbillonnaire.

Si le mouvement longitudinal de la corde est alternatif, cette rotation change de sens avec le mouvement, ou quelque peu en retard à cause de l'inertie du liquide.

Or, on doit supposer que le mouvement alternatif du fluide dans l'excitateur produit quelque chose de semblable dans la gelée qui l'environne.

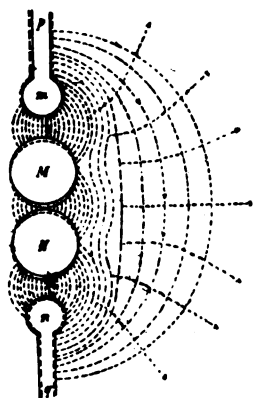


Fig. 8. — Déplacement électrique

Mais, tandis que le mouvement tourbillonnaire de l'eau, agitée par la corde, s'étend par un *accroissement* du volume des premiers tourbillons, et par une formation d'une seconde couche de tourbillons tournant *en sens contraire* à la première et ainsi de suite (ce qui est permis par la faculté qu'ont les molécules de l'eau, initialement voisines, de se détacher complètement et d'adopter n'importe quel arrangement relatif), le mouvement tourbillonnaire de la gelée agitée par le fluide (de l'éther agité par le courant électrique), doit s'étendre sans

séparer complètement les particules, en contact tout d'abord, et cela pour ne pas contrevenir à la *cohérence* du milieu. Les tourbillons, dans l'éther, doivent donc se borner à être des *filaments* fermés, doués d'une rotation intérieure et ne comprenant qu'une seule particule dans chaque section. Quant à la propagation du mouvement, elle se fait par formation successive de nouveaux tourbillons concentriques tournant tous *dans le même sens*. Ce mouvement, que j'appellerai *tourbillonnement magnétique*, n'interfère pas avec le déplacement électrique, parce qu'il ne bouge pas de leur place les particules du milieu auxquelles il ne fait que conférer un mouvement rotatoire autour d'un axe déterminé par chacune d'elle. Cet axe est normal au plan qui contient la particule et le courant agissant rectiligne.

On comprend aisément que l'on ne puisse représenter exactement ce mouvement avec aucun mécanisme hydrodynamique. On doit à MM. W. Thomson (Lord Kelvin), Lodge, Fitzgerald, etc., d'autres mécanisme plus ou moins compliqués. Quelques-uns de ceux-ci représentent, outre la propagation de la perturbation du milieu, son action sur les corps qui s'y trouvent noyés. Mais quoique le tourbillonnement magnétique ait effectivement plus d'importance que le déplacement électrique, je ne m'attarderai plus sur ce sujet pour aborder, sous un autre point de vue, la propagation des deux perturbations, rectiligne et rotatoire, du milieu. De plus, j'envisagerai plus particulièrement la première, qui se prête à des considérations plus faciles.

ONDES DE PROPAGATION.

Retournons donc au mouvement de la gelée qui doit représenter le *déplacement électrique*, et considérons, dans chaque plan méridien du mécanisme exciteur, des lignes coupant partout orthogonalement les lignes de flux de la

gelée. A une certaine distance de la région centrale du système excitateur, à une distance par rapport à laquelle les dimensions de ce système sont négligeables, les lignes de flux sont approximativement des cercles méridiens, et leurs trajectoires orthogonales des rayons de sphères ayant le centre au centre du système et deux pôles sur le prolongement de l'axe de ce système.

Si, à présent, on envisage séparément un cylindre indéfini de gelée le long d'un de ces rayons, on voit que sa contenance pendant l'excitation est celle d'une corde indéfinie secouée à une de ses extrémités

Dans de telles conditions, une corde vibre autour de sa position de repos — qui devient sa position moyenne — en prenant une forme tortueuse qui semble s'avancer le long de la corde avec une vitesse uniforme, tandis que l'amplitude de son ondulation diminue progressivement.

Si le bout de la corde est secoué suivant une droite perpendiculaire à la corde et contenue, par exemple, dans un plan vertical, aucun point de la corde ne quitte jamais ce plan. Le mouvement du bout commandé étant pendulairement périodique, la corde prend une forme



Fig. 9 — Propagation des ondulations.

sinusoïdale. A chaque *période*, il est engendré sur la corde une nouvelle *onde* complète qui se propage derrière les précédentes. Il est à remarquer que chaque point de la corde parcourt un segment de droite; qu'il a la plus grande

vitesse, quand il passe par sa position initiale ou moyenne, et qu'il a une vitesse nulle quand il acquiert l'écart maximum de cette position (*amplitude*).

On dit, dans ce cas, que le mouvement ondulatoire est *polarisé rectilignement* ou *dans un plan*.

Si, au contraire, le bout de la corde est agité n'importe comment autour de sa position initiale dans un plan normal à la corde même, celle-ci quitte nécessairement tout plan fixe contenant sa position initiale. Le mouvement du bout commandé étant révolutionnairement périodique, la corde prend une forme en hélice. A chaque *période*, il s'engendre sur la corde une nouvelle *spire* complète qu'on peut appeler aussi une *onde*. En général, il peut n'y avoir aucune relation constante entre l'écart et la vitesse de chaque point de la corde, qui peut décrire même une courbe continuellement changeante dans son plan normal à la ligne moyenne. On dit, dans ce cas, que le mouvement ondulatoire n'est *aucunement polarisé*. Si la trajectoire de chaque point de la corde était une ellipse ou bien une circonférence fixe, on dirait que le mouvement ondulatoire est polarisé elliptiquement ou circulairement.

Il convient de remarquer qu'on peut prendre le cas particulier de la polarisation rectiligne du mouvement comme cas élémentaire, et considérer le cas général du mouvement ondulatoire comme dû à la composition de deux ou de plusieurs mouvements polarisés dans des plans différents et aux caractéristiques différentes (amplitude, période et phase).

Avec le mécanisme-image de l'excitateur étudié plus haut, on produirait donc des oscillations de la gelée polarisées rectilignement, le mouvement s'accomplirait partout dans le plan méridien, s'il n'y avait pas de causes perturbatrices de la symétrie.

Si l'on envisage à présent, non plus un rayon isolé, mais une double infinité de rayons émanés dans toutes les directions par une même source de dimensions restreintes, on voit que le mouvement transversal s'avancant sur chaque rayon avec une même *vitesse de propagation*, se répand sphériquement. Tout l'espace compris entre deux sphères, bornant sur chaque rayon une ondulation complète, prend le nom d'*onde de propagation*. Cette onde, essentiellement mobile, maintient toujours la même profondeur, c'est pourquoi son volume croît seulement un peu plus vite que le carré de son rayon intérieur et un peu moins vite que le carré de son rayon extérieur.

Il résulte encore de l'uniformité du mouvement de propagation dans un milieu homogène, que cette profondeur, qui n'est autre chose que la *longueur d'onde* λ , est le produit de la vitesse de propagation v du mouvement transversal dans le milieu que l'on considère par la *période* T ou durée d'une oscillation complète ; par conséquent, la vitesse de propagation peut toujours s'obtenir en multipliant la longueur d'onde d'un système quelconque d'oscillations par la *fréquence* n relative au nombre des périodes qui s'accomplissent dans l'unité de temps

$$\lambda = v T \qquad v = \lambda n \qquad n T = 1$$

Revenons maintenant au cylindre de gelée, indéfini et extrêmement délié, occupant une ligne orthogonale à celles de flux de la gelée, et comparé à une corde ébranlée à son extrémité. J'ai voulu matériellement représenter avec ce cylindre la propagation du déplacement électrique dans l'éther le long d'un *rayon de propagation*.

Mais, effectivement, ce déplacement est virtuel ; il n'a pas d'existence réelle comme celui de la gelée.

Le déplacement électrique est une *grandeur* douée

d'une valeur et d'une direction ; c'est un *vecteur* comme une translation ordinaire. Mais ce n'est peut-être pas précisément une translation de l'éther, même infiniment petite.

Également, le tourbillonnement magnétique est aussi *vecteur* comme une rotation ordinaire, mais ce n'est peut-être pas précisément une rotation de l'éther, même infiniment petite.

Il est donc mieux de ne plus considérer, à présent, le cylindre de gelée ou la corde représentant le phénomène électrique comme le lieu actuel des points qui se trouvaient initialement en une position moyenne sur le rayon de propagation, mais plutôt comme le lieu des extrémités d'une série de vecteurs sortant du point initial ou moyen et aboutissant au point actuel, destinés à représenter une *grandeur douée d'une valeur et d'une direction sans aucun égard à sa nature*. Car si l'on envisage la courbe ondoyante, plane ou gauche, décrite plus haut, comme un *diagramme* des conditions du milieu le long du rayon, en se réservant d'accepter les définitions plus parfaites de ces conditions que l'avenir pourra fournir, on prépare l'esprit à un *concept scientifique* bien plus général.

Quoiqu'il en soit, on peut donc représenter par deux diagrammes (deux courbes tortueuses, toutes les deux planes, ou bien toutes les deux gauches, se déplaçant avec la même vitesse), la propagation du déplacement électrique et du tourbillonnement magnétique. Ces deux grandeurs sont généralement perpendiculaires entre elles et au rayon de propagation. Ainsi, dans le cas particulier étudié plus haut, la direction du déplacement est tangente au méridien ; celle du tourbillonnement est tangente au parallèle ; celle de la propagation suit le rayon de la sphère passant par le point que l'on considère et concentrique au système excitateur.

Après avoir tenté de donner une vague idée représentative des actions subies par le milieu, je tâcherai de donner, en termes ordinaires, une idée des actions produites par le milieu ébranlé.

J'insiste, en attendant, sur la douteuse réalité du déplacement et du tourbillonnement sus-indiqués, quoiqu'ils puissent servir à expliquer matériellement beaucoup de phénomènes. En tout cas, les hypothèses concernant les mouvements de l'éther faites plus haut, ne sont pas complètes. De plus, il y aura lieu de considérer plus loin une autre hypothèse (celle du mouvement lumineux de l'éther) qui ne se concilie pas toujours avec les précédentes.

Pourtant, il n'a pas été inutile de commencer par la considération d'un simple déplacement du milieu, car un déplacement, même idéal, est le phénomène dont on peut concevoir la propagation avec le moins d'effort. Il n'aurait pas été aussi facile de donner certaines définitions, si au lieu d'un déplacement on avait envisagé une rotation ou quelque autre vecteur.

D'ailleurs, comme le vecteur dont on devra le plus souvent considérer la propagation sera une *force*, un artifice très commode se présente à l'esprit : rien n'empêche, en effet, quand on veut se figurer la propagation d'une action quelconque de la nature d'une force, de penser à un déplacement particulier du milieu et de prendre ce déplacement comme cause de la force même, de la même manière que l'on peut toujours accoupler l'idée de la pression distribuée dans un corps élastique à celle de la déformation qui la produit.

PERTURBATIONS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

On sait bien qu'un courant électrique produit autour de lui un *champ magnétique*. On veut dire par là que le

courant produit une modification spéciale dans l'éther environnant, en vertu de laquelle ce milieu vient à transmettre une force particulière. Cette force, appelée *induction* dans l'électrotechnique, *force électro-magnétique* dans la physique mathématique et simplement *force magnétique* dans les théories électro-optiques, n'a pas d'action sur une masse quelconque ; mais elle a le pouvoir de déplacer le magnétisme dans les corps magnétiques (action physique) et de déplacer dans l'espace les corps aimantés par son influence ou bien à l'avance (action dynamique). On sait que le champ est complètement défini quand on possède le moyen de déterminer la direction et l'intensité de cette force pour chaque point du champ même. Cette force dépend de la forme du circuit, de la nature des corps environnants et de l'intensité du courant.

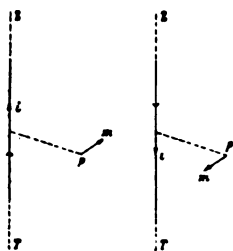


Fig. 10. — Force magnétique.

Si le courant — et partant le champ magnétique — est variable, sa variation produit une modification ultérieure dans l'état de l'éther ambiant, à laquelle on fait allusion en disant que la variation du champ magnétique produit un *champ électrique*. Alors le milieu vient à transmettre une nouvelle force qu'on pourrait appeler *force électro-motrice* et que dans les théories électro-optiques on appelle simplement *force électrique*, tout comme une force électro-

statique, en acceptant l'hypothèse de Maxwell sur l'unité des forces électriques.

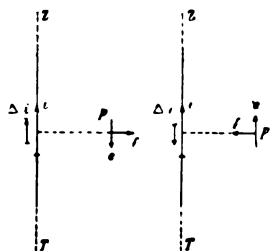


Fig. 11. — Force électrique.

Cette force aussi n'a pas d'action pondéromotrice ; mais elle a le pouvoir de déplacer l'électricité dans les corps conducteurs, d'engendrer des courants (action physique). Le nouveau champ est défini complètement comme toujours par la distribution de la force électrique. Quant à cette force, elle dépend de la forme du circuit, de la nature des corps environnants et de la *variabilité du courant*.

Ces phénomènes prennent le nom de phénomènes d'*induction électro-magnétique*.

[Pour compléter le tableau des actions d'un courant dans le sens le plus général, je ferai remarquer que, pendant que le champ électrique engendre un courant dans un conducteur, le champ magnétique agit sur celui-ci en le sollicitant à se déplacer dans l'espace (action dynamique). De semblables phénomènes prennent le nom de phénomènes électro-dynamiques]

Les variations, toujours simultanées, du champ magnétique et du champ électrique sont ordinairement dénommées *perturbations électro-magnétiques* du milieu. Elles peuvent s'obtenir aussi autrement que par un courant variable. [En général, on peut dire qu'on ne peut déterminer aucune

variation dans un champ magnétique (ou électrique), à quelque sorte de dispositions qu'il soit dû, sans engendrer en même temps un champ électrique (ou magnétique) ;. Mais il nous suffit ici d'envisager le seul cas des perturbations électro-magnétiques engendrées par un courant variable.

Ces perturbations partent donc de la source d'excitation, mais elles n'envahissent pas instantanément tout le champ ; au contraire, elles se propagent dans l'espace avec une vitesse qui, quelque grande qu'elle soit, n'en cesse pas moins d'être finie.

Ces perturbations, qui ne s'obtiennent pas sans une dépense de travail, sont capables à leur tour de produire des travaux. C'est pourquoi l'on peut dire que la propagation des perturbations électro-magnétiques dans l'espace est une propagation d'énergie, comme celle du son, de la chaleur, de la lumière.

Considérons, à présent, pour la simplicité, les effets d'un courant *variable* rectiligne indéfini, en un point et à un instant donnés.

On sait que, dans ce cas, la *force électro-magnétique* est dirigée normalement au plan passant par le point et le courant, dans un sens qui dépend du *sens du courant*, et que son intensité est proportionnelle à l'*intensité du courant*; tandis que la *force électromotrice d'induction* est contenue dans le plan indiqué, dirigée parallèlement au courant, dans un sens qui dépend du *signe de la variation du courant* (augmentation ou diminution) et que sa valeur est proportionnelle à la *variabilité du courant* (taux de la variation par rapport au temps).

Si la nature du milieu au point considéré permet que, de cette action, résulte un flux d'électricité proportionnel à cette action même, l'élément matériel dans

lequel il s'engendre est assujetti à une *force dynamique* contenue dans le plan indiqué, dirigée normalement au courant dans un sens qui dépend en même temps de celui du courant et de celui de ce flux électrique. L'intensité de cette force est aussi proportionnelle à la fois à la valeur de ces deux éléments ; par ce qui a été dit, elle est donc proportionnelle au produit des intensités des deux forces électro-magnétique et électro-motrice d'induction, c'est-à-dire encore au produit des intensités des deux champs magnétique et électrique, au point et à l'instant que l'on considère.

La force magnétique, aussi bien que la force électrique (en adoptant les expressions des théories électro-optiques pour la simplicité du langage), diminuent avec un accroissement de la distance entre le courant et le point considéré. L'action mécanique éventuelle diminue donc *a fortiori*.

Mais la variation de la distance a encore un autre effet : elle produit un retard des effets par rapport aux causes, des perturbations par rapport aux excitations.

Si l'on veut donc rapporter la direction et la valeur des forces magnétique et électrique à l'*intensité* et à la *variabilité* du courant, on doit considérer pour ces deux grandeurs, les valeurs qu'elles avaient à un instant précédant celui que l'on considère d'autant que la durée qu'il faut à la perturbation électro-magnétique pour se propager de sa source au point considéré, avec la vitesse propre au milieu ambiant.

En général, maintenant, quelle que soit la forme du circuit parcouru par le courant variable, on a toujours à considérer dans les phénomènes électro-magnétiques *trois directions* principales en tout point de l'espace : celle de la force magnétique, celle de la force électrique et celle de la propagation ; elles sont toujours orthogonales entre elles.

Quant à cette propagation de la force magnétique et de la force électrique, qui s'avancent simultanément, puisque l'une est due à la variation de l'autre, comment se produit-elle ? Que l'on imagine que les deux forces dépendent de deux déplacements de l'éther, tels qu'on ne puisse pas les composer l'un avec l'autre, parce que ces deux forces aussi ne peuvent pas se composer en une résultante, étant de natures intimement différentes. Que l'on suppose par exemple, que la force électrique soit due à un déplacement ayant le caractère d'une translation et que la force magnétique soit due à un déplacement ayant le caractère d'une rotation. On a un exemple, quoique très grossier, d'une force produite par un déplacement rotatoire dans la tension qui se développe dans un fil de caoutchouc que l'on tord.

Il devient alors naturel d'appliquer à la propagation d'une des forces indiquées tantôt les lois que l'on a vu régir la propagation d'un *déplacement transversal* quelconque, puisque ces forces aussi sont *transversales* par rapport aux rayons de propagation.

Si j'avais pu réussir à étudier plus complètement que je ne l'ai fait, c'est-à-dire en tenant compte de toutes les causes de perturbation et des réactions réciproques, le *déplacement électrique* et le *tourbillonnement magnétique* (qui sont aussi transversaux par rapport au rayon de propagation et qui ne peuvent non plus se composer ensemble), j'aurais pu maintenant accoupler à ces vecteurs, déplacement électrique et tourbillonnement magnétique, les deux vecteurs force électrique et force magnétique qui sont également dirigés. J'aurais ainsi rapproché les effets de leur cause, parce que la force électrique aurait alors pu être considérée comme un fait dépendant du déplacement électrique et la force magnétique comme un fait dépendant du tourbillonnement magnétique déter-

miné dans l'éther ; mais j'y renonce ; les considérations exposées relativement à la propagation d'un déplacement m'épargnent de m'étendre plus longuement, à présent, sur la propagation des perturbations électro-magnétiques.

La ressemblance de la propagation des forces électrique et magnétique avec celle des mouvements transversaux dans les milieux élastiques, que j'ai présentée comme une chose intuitive, n'est pas un fait hypothétique. Si elle ne se présenta pas à l'esprit de Faraday (qui fit pourtant de grands pas sur le chemin de l'explication des actions électriques et magnétiques par l'intervention du milieu), elle fut d'abord le fruit de la fine analyse de Maxwell, et fut ensuite le sujet de l'œuvre expérimentale de Hertz, la plus haute conquête de la physique en cette fin de siècle.

OSCILLATIONS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

Dans le cas où l'action perturbatrice (c'est-à-dire le courant variable, puisque je n'en considérerai pas d'autre) a un rythme, je pourrai donc affirmer que les deux forces propagées, magnétique et électrique, sont périodiques par rapport au temps en chaque point de l'espace, et sont périodiques dans l'espace à un instant quelconque. Je pourrai, en outre, parler sans embarras de *période* T , de *fréquence* n , de *longueur d'onde* λ , de *vitesse de propagation* v et de *radiations ordinaires* comme de *radiations polarisées* de différentes manières.

Il n'est pas nécessaire que je dise que ces perturbations périodiques reçoivent le nom d'*oscillations électro-magnétiques*.

Il est facile de voir que si la source de ces perturbations périodiques est très petite et telle que le mouvement électrique exciteur doive toujours s'accomplir en elle dans une même direction, la radiation électro-magnétique

sera polarisée dans un plan. On nomme *plan d'oscillation* le plan contenant le rayon de propagation et parallèle à la direction de la source. La force électrique, en tout point du rayon, est contenue dans ce plan. On nomme *plan de polarisation* le plan contenant le rayon et normal au plan d'oscillation. La force magnétique, en tout point du rayon, est contenue dans cet autre plan caractéristique.

Dans chaque plan normal au rayon on a donc un champ électrique et un champ magnétique *alternatifs* qui se croisent.

J'ai déjà fait remarquer, en parlant de la vitesse et de l'écart de sa position primitive d'une corde secouée à une extrémité, une circonstance qui se vérifie pour n'importe quelle grandeur naturelle alternative *simple*. Les variations sont les plus rapides quand sa valeur absolue est la plus petite, et ses variations sont les plus lentes quand sa valeur absolue est la plus grande. Partant, la force électrique, qui dépend des variations de la force magnétique, est nulle ou maxima quand celle-ci est maxima ou nulle.

Les deux champs n'ont donc pas seulement deux directions en croix, mais encore deux phases différentes : ils sont décalés d'un quart de période, l'un par rapport à l'autre. Les deux forces peuvent donc être représentées par les deux projections, sur les traces fixes du plan d'oscillation et du plan de polarisation, d'un vecteur tournant, variable en général, sans aucune signification précise, puisque les deux forces, de nature différente, ne peuvent pas se composer.

La figure 12 peut donc représenter un diagramme instantané des deux grandeurs.

Si, au contraire, dans la source des perturbations périodiques, encore très petite, le mouvement électrique excitateur s'accomplit dans une direction continuellement

variable ; ou bien si l'on considère plusieurs sources très petites, dont les mouvements électriques s'accomplissent dans des directions et avec des phases différentes

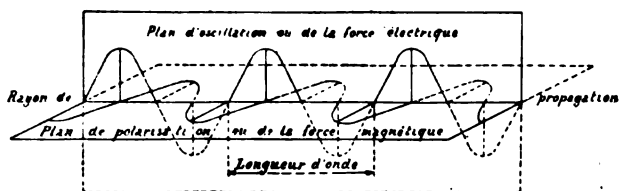


Fig. 12. — Propagation des forces électrique et magnétique.

mais avec une même période), et agissant sur un même rayon de propagation, la radiation électro-magnétique, en général, ne sera plus polarisée dans un plan.

La force électrique et la force magnétique, encore perpendiculaires entre elles, tourneront continuellement autour de chaque point du rayon. Dans chaque plan normal au rayon, on a donc un champ électrique et un champ magnétique *tournants* qui se suivent.

Le lieu des extrémités des vecteurs qui représentent les deux forces à un instant déterminé le long d'un rayon, ne sera plus un système de deux courbes planes, ressemblant à des sinusoides, qui évitent de se rencontrer sur le rayon ; mais ce sera un système de deux courbes gauches, ressemblant à des hélices, qui s'entortillent autour de ce rayon, sans pourtant se croiser.

Mais que la radiation soit polarisée ou non, la période des deux forces est nécessairement la même, et la propagation de la perturbation peut être représentée par une *translation uniforme* du diagramme instantané le long du rayon, pendant que les dimensions transversales de ce diagramme, par rapport au rayon même, sont sensées

décroître continuellement, comme il arrive pour l'intensité des deux forces en s'éloignant de la source.

Si la source des oscillations électro-magnétiques n'est pas très petite, si c'est un vrai excitateur, aux dimensions finies, il pourra arriver que quelques-unes de ses parties émettent des radiations polarisées et d'autres des radiations ordinaires.

Comme les directions de la force magnétique et de la force électrique dépendent de la direction de l'oscillation électrique qui s'accomplit dans la source à un certain instant, on conçoit facilement, d'après ce que je viens de dire, que toutes les parties filiformes rayonneront des oscillations polarisées, tandis que les parties ayant les trois dimensions du même ordre de grandeur *pourront* rayonner des oscillations ordinaires ; il suffit, pour cela, que le flux électrique excitateur change de direction de point à point ou d'instant en instant, comme la forme du conducteur le permet alors. En particulier, une lame plane, en de certaines circonstances, peut rayonner des oscillations de nature différente dans les différentes régions de l'espace.

Dans le cas d'un excitateur de dimensions finies (ZABCDT), un point quelconque P de l'espace ressent, à un instant quelconque, les effets des variations que le courant électrique présentait dans tous les éléments A, B, C, D . . . de l'excitateur, à des instants précédant celui que l'on considère de tout le temps qui est nécessaire pour la propagation de la perturbation le long des lignes AP, BP, CP, DP. . . séparément. Toutes les forces électriques élémentaires dues à ces différentes variations se composent en une force électrique locale. Un élément linéaire de conducteur en P ressent l'effet de la composante de

cette force suivant sa direction, en proportion de sa longueur. Cet effet, sur le conducteur, n'est autre chose que l'*induction d'une force électro-motrice*. Un système conducteur, de dimensions finies (ZPQT), devient ainsi le siège d'une force électro-motrice induite totale, qui s'obtient en intégrant les effets de toutes les forces électriques locales agissant sur tous ses éléments P, Q ...

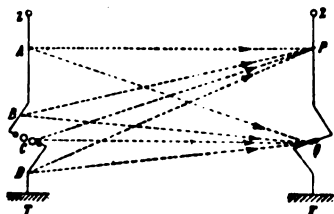


Fig. 13. — Induction.

En procédant ainsi, on néglige toutefois les perturbations que le système influencé produit à son tour sur le milieu ambiant et qui peuvent réagir sur lui-même (self-induction). Mais les considérations qui vont suivre n'exigent pas strictement qu'on en tienne compte ici.

RÉSONANCE.

Il n'est pas nécessaire de réfléchir longtemps pour se persuader que la force électro-motrice totale induite dans le système influencé est périodique et de même rythme que le courant variable qui l'excite, quelles que soient la forme et la position des deux organes.

Cette force électro-motrice totale d'induction tendrait donc à produire des oscillations électriques de même fréquence que celles qui ont lieu dans le radiateur.

Mais dans le système influencé aussi bien que dans l'excitateur interviennent les actions de la capacité et de la self-induction, outre celle de la résistance ohmique.

Comme on a déjà vu, ces trois éléments prédisposent le conducteur à être le siège d'oscillations électriques d'une fréquence particulière.

Si la fréquence caractéristique du conducteur induit est égale à celle du radiateur, il arrive que la force électro-motrice induite obtient un effet maximum en produisant des flux électriques oscillatoires qui ont le rythme commun des deux appareils. Si, au contraire, la période propre du conducteur influencé est différente de celle de l'excitateur, les oscillations électriques engendrées par induction présentent le rythme que le conducteur induit préfère ; mais leur intensité est d'autant plus faible que la différence entre les deux périodes propres est plus sensible.

Un phénomène semblable se rencontre dans l'acoustique et se nomme résonance. Les vibrations d'un diapason donnant une certaine note excitent d'autres diapasons à vibrer. Ces diapasons résonnent d'autant mieux que leur note fondamentale est plus proche de la note du diapason excitateur ou d'une de ses harmoniques simples.

Mais ce phénomène, très-accentué dans l'acoustique, est bien moins net dans l'électro-magnétisme. De plus, tout ce qui se rapporte aux harmoniques, dans le champ des oscillations électro-magnétiques, n'est pas encore bien établi.

Partant, le nom de *résonateur* devrait être réservé à un conducteur prédisposé à se laisser parcourir par des oscillations de même fréquence ou *en accord* avec les oscillations qui parcourent le radiateur ; mais cette appellation est ordinairement étendue à tout système qui peut servir à déceler la présence des perturbations électro-magnétiques produites par un excitateur.

Un résonateur consiste, en général, en un circuit ouvert ou fermé présentant une petite discontinuité dans

laquelle on peut remarquer les effets des oscillations électriques induites. Cette discontinuité peut manquer quand on se sert d'artifices particuliers pour mettre en évidence ces oscillations. On change la période propre du résonateur en faisant varier sa capacité C et sa self-induction L , car, quand la résistance ohmique est négligeable, cette période est proportionnelle à la moyenne géométrique de ces deux grandeurs.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Mais il importe d'insister encore sur le fait qu'il n'est pas absolument nécessaire de produire un accord parfait entre le radiateur et le résonateur pour remarquer de sensibles effets d'induction.

Si l'on considère une certaine fréquence n de l'excitateur et si l'on représente par un diagramme l'intensité de la résonance, en prenant pour abscisses les fréquences et pour ordonnées les amplitudes des vibrations dans le résonateur, on voit que le phénomène acoustique donne

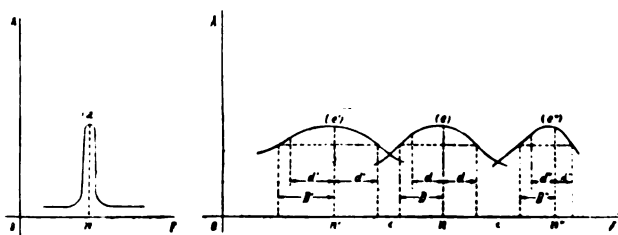


Fig. 14. — Phénomène de résonance.

lieu à un diagramme qui a l'allure de la courbe (a), tandis que le phénomène électrique donne lieu à un diagramme qui a l'allure de la courbe (c). La seconde ligne montre que l'amplitude de la vibration excitée, par sympathie pourrais-je dire, est un peu moindre que son maximum.

même pour des différences de rythme assez sensibles entre le résonateur et le radiateur ; tandis que la première ligne indique qu'il suffit d'un tout petit désaccord pour éteindre presque complètement la vibration répondante.

Cela ne doit pas étonner, si l'on pense qu'il est possible de réduire les résistances nuisibles dans un résonateur *électrique* à un degré tel qu'elles soient incomparablement moins importantes que les frottements matériels intérieurs et l'inertie du diapason le plus sensible.

A part cela, il est un autre fait d'une certaine importance que les physiciens connaissent bien : à égale différence de fréquence ou de période propre entre le radiateur et le résonateur, la sensibilité de celui-ci est plus grande quand il possède un rythme plus lent que l'excitateur, et plus petite quand il possède un rythme plus accéléré que cet appareil.

Il se pourrait aussi que le même degré de sensibilité s'étendit à des différences de période propre plus amples entre les deux appareils, quand on descend à des tons bas dans la gamme des oscillations, que quand on monte à des tons aigus dans cette gamme. Il conviendrait de s'assurer expérimentalement de ce fait

DÉCÈLEMENT DES OSCILLATIONS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

On a vu que l'on décèle les oscillations électro-magnétiques qui se produisent dans l'espace, au moyen de résonateurs dans lesquels on cherche à mettre en évidence les oscillations électriques induites. A cet effet, on ménage généralement dans ces appareils une interruption centrale qu'on laisse envahir par l'air à la pression atmosphérique ou dans laquelle on place un tube contenant des gaz raréfiés. Dans le premier cas, si l'interruption n'est pas trop large, il se produit des étincelles que l'on peut

même rechercher à l'aide d'un microscope. Dans le second cas, si la pression est suffisamment réduite, il se produit des lueurs continues ou stratifiées. On peut se servir encore de beaucoup d'autres moyens de décèlement des flux électriques induits, qui sont toujours très faibles ; mais le meilleur moyen est peut-être de recourir aux *coherers*, appareils dans lesquels on utilise la propriété des oscillations électriques d'augmenter la conductibilité ohmique de certaines limailles métalliques.

La nécessité de désagréger ces limailles, rendues conductrices par le passage d'une série de flux électriques oscillatoires, pour rétablir leur résistance primitive et la possibilité de le faire au moyen de petites secousses, ont fait supposer que les oscillations électriques confèrent à chaque grain de la limaille une orientation particulière, capable de donner à toute la masse une cohésion exceptionnelle et partant une plus grande conductibilité. C'est même de cela que vient l'appellation de *coherer*.

Mais, j'ose penser que la raison intime du phénomène doit être moins matérielle, en raison de la petitesse de l'énergie mise en jeu ordinairement dans un résonateur.

Je pense que le phénomène indiqué, toutes proportions gardées, peut être analogue à celui en vertu duquel on peut établir l'arc voltaïque entre deux pointes de charbon, placées à une distance plus grande que la distance explosive qui correspond à la différence de potentiel qu'on leur applique, en faisant éclater entre elles de très minces étincelles, au moyen de la décharge d'un condensateur. Ces étincelles, moins résistantes que la couche d'air qu'elles percent, frayent un chemin d'une médiocre conductivité au courant qui doit entretenir l'arc.

Il se pourrait de même que, dans le *coherer*, de microscopiques étincelles déterminées par les perturbations

électro-magnétiques (qui en raison de leur excessive variabilité peuvent produire de hautes différences de potentiel sous de petits espaces) vinssent à percer la mince couche d'oxyde interposée entre les grains de la poudre métallique. Ces étincelles prépareraient ainsi le chemin à des courants locaux plus intenses.

Il se pourrait encore, comme M. Lodge l'a déjà pensé, que le phénomène indiqué dût se rattacher au changement de résistibilité du sélénium avec le degré d'éclairage, car les radiations lumineuses doivent être considérées comme des radiations électro-magnétiques de fréquence plus élevée que celles que l'on obtient avec les excitateurs électriques. M. Branly propose pour ces tubes sensibles à limailles métalliques le nom de *radio-conducteurs*.

ÉLECTRO-OPTIQUE.

Jusqu'à présent, dans l'étude de la propagation des oscillations électro-magnétiques, j'ai supposé que le milieu interposé entre le conducteur d'excitation et le conducteur influencé était homogène, à l'instar de l'air, où l'éther a des propriétés peu différentes de celles qu'il a quand il est dans le vide matériel.

Il faut donc encore se former une idée de la propagation des ondulations électro-magnétiques quand elles rencontrent des corps diélectriques de nature différente, ou bien des corps conducteurs.

Dans ce but, il suffit de savoir que la propagation de ces ondulations est absolument analogue à celle des vibrations lumineuses. En effet, il suffit de supposer que, dans le phénomène électro-magnétique, l'éther vibre transversalement à la direction du rayon — dans la direction de la force électrique ou de la force magnétique — pour retrouver l'état de choses que la théorie moderne de la lumière suppose se produire dans le phénomène lumineux.

A ce point, il n'est pas inutile que nous jetions un coup d'œil sur l'histoire de l'étude des ondulations électriques.

Clerk Maxwell, dans son ouvrage sur l'électricité et le magnétisme qui est devenu classique, essaya de trouver une explication des phénomènes électriques et électromagnétiques — qui de son temps étaient généralement considérés comme des actions s'exerçant tout simplement à distance — en adoptant la façon de voir de Faraday, c'est-à-dire en ayant recours à l'hypothèse d'un milieu apte à propager ces actions d'un point de l'espace à un point voisin et ainsi de suite, sans discontinuité.

Il eut donc recours au mouvement d'un fluide hypothétique remplissant tout l'espace. A vrai dire, l'explication des phénomènes des différentes catégories que l'on a à considérer dans l'électrologie l'entraîna à assigner tour à tour à ce fluide des propriétés contradictoires.

Pourtant, un fait d'une importance exceptionnelle surgit de sa théorie de l'électro-magnétisme et de l'induction. Ce résultat est l'identité des propriétés essentielles de l'éther qui transmet, selon Fresnel, les radiations lumineuses, avec celles du fluide qui préside, selon Maxwell, aux actions électro-magnétiques.

Cette coïncidence pourrait même être considérée comme une confirmation de l'existence d'un fluide servant en général, de véhicule à l'énergie rayonnante. Mais cette coïncidence suggéra encore à Maxwell l'idée de considérer la lumière comme un phénomène électro-magnétique, c'est-à-dire de supposer que le mouvement vibratoire lumineux est dû aux perturbations périodiques d'un champ magnétique.

Une telle théorie — qui prend le nom de *théorie électromagnétique de la lumière* — conduit nécessairement à certaines relations entre les constantes optiques et les

constantes électriques d'un même corps, dont la vérification expérimentale serait un argument à l'appui de la théorie même.

Une des meilleures vérifications de ce genre repose sur l'accord de la valeur de la vitesse de propagation de la lumière dans l'éther ou dans l'air, trouvée par Foucault, Fizeau, Cornu, avec celle à laquelle on arrive dans la théorie de l'électricité, en comparant les unités du système électrostatique avec celles du système électromagnétique.

D'autres vérifications furent encore tentées, comme celle de l'accord entre la valeur de l'indice de réfraction et la racine carrée de la valeur du pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique transparent. Mais elles ne furent pas décisives parce que, en dehors des difficultés expérimentales, pendant bien des années, ces vérifications se rapportèrent à des coïncidences qui ne dépendaient pas strictement des seules hypothèses fondamentales.

Il fallait, au contraire, essayer de produire et d'étudier directement des perturbations électro-magnétiques qui eussent certaines caractéristiques communes avec les vibrations lumineuses: périodicité et très haute fréquence.

Hertz et Lodge furent les premiers à effectuer de pareilles expériences en 1887. Un an après, au moyen des décharges oscillantes, étudiées bien auparavant par W. Thomson, Hertz réussit à produire des ondulations électro-magnétiques d'une fréquence de 100 millions de périodes complètes par seconde, et à retrouver presque toutes les lois fondamentales de l'optique comme lois de propagation de ces radiations dans l'espace, confirmation tout-à-fait directe et évidente de la théorie électro-magnétique de la lumière imaginée par Maxwell.

Après Hertz, de très nombreux expérimentateurs comme Blondlot, Sarasin et de La Rive, Hagenbach et

Zehnder, Lecher, Lodge même, Bjerkness, Klemencic, Trouton, Toepler, Boltzmann, Righi, Garbasso, Lebedew, Ritter, etc., confirmèrent toujours par des expériences, soit plus minutieuses, soit plus complètes, que la contenance des ondulations électro-magnétiques ne diffère de celle des radiations lumineuses qu'en ce qui se rapporte à la différence de la période ou de la longueur d'onde.

En effet, les fréquences employées dans les expériences indiquées s'élevèrent peu à peu de 100 à 50 000 millions d'oscillations par seconde; c'est-à-dire les longueurs d'onde relatives descendirent de 3 000 à 6 millimètres. Tout récemment, on est encore descendu à des fractions de millimètre. Mais, avec tout cela, on est encore assez loin des fréquences de 400 à 800 millions d'oscillations par seconde, correspondant aux radiations rouges et violettes sur lesquelles la longueur d'onde se restreint des $7\frac{1}{2}$ aux $3\frac{3}{4}$ dixmillièmes de millimètre.

Les radiations électro-magnétiques représenteraient donc dans la gamme des radiations lumineuses dont une octave seulement est visible (du rouge au violet) des tons non visibles très graves; comme les radiations X de Röntgen y représentent peut-être des tons non visibles très hauts.

On démontra donc que les ondulations électro-magnétiques sont réfléchies, réfractées, diffractées, dispersées, qu'elles peuvent donner lieu à des phénomènes d'interférence, de polarisation, de double réfraction, etc., dans les circonstances particulières qui découlent de leur période propre de vibration, car leur vitesse de propagation dépend de cette période, sauf dans l'éther et dans les gaz quasi-parfaits, où toute vibration transversale a la même vitesse de propagation.

En d'autres termes, comme les radiations lumineuses

peuvent traverser ou non certaines substances, ou bien être assujetties à des déviations différentes dans la réfraction, ou bien s'avancer à des profondeurs différentes dans la réflexion, ou bien se fléchir plus ou moins (suivant une locution erronnée mais expressive) en contournant un corps opaque, toujours selon leur *couleur*; de même les oscillations électro-magnétiques trouvent dans un corps donné une substance transparente ou opaque, une substance plus ou moins réfringente selon leur *fréquence*.

En général, les corps transparents à la lumière le sont aussi aux radiations électro-magnétiques; tels sont les diélectriques; les corps opaques ou aptes à réfléchir la lumière ont les mêmes propriétés par rapport à ces radiations; tels sont les métaux et les conducteurs en général.

Mais la différence entre les fréquences des deux ordres de phénomènes admet que l'on puisse rencontrer de sensibles écarts de ces règles, sans que l'on puisse opposer pour cela une contradiction à la théorie générale.

Que l'on remarque que la plus grande longueur d'onde des radiations électro-magnétiques leur confère une plus grande tendance à se diffracter et à se disperser que la lumière; et ceci est un fait de grande importance par rapport à la propagation de ces radiations à de grandes distances.

TREILLIS MÉTALLIQUES.

L'objet de cette exposition exige que je m'arrête encore sur la production et sur la conduite des radiations électro-magnétiques polarisées dans un plan.

(Dans l'optique ordinaire, le plan de polarisation est défini et expérimentalement déterminé par des propriétés manifestes du rayon polarisé.

Dans la théorie électro-magnétique de la lumière, on

trouve que ce même plan est celui qui contient le rayon et la force magnétique et qui, partant, est perpendiculaire à la force électrique. C'est ainsi que je l'ai défini précédemment.

Mais comment les vibrations transversales lumineuses de l'éther s'accomplissent par rapport au rayon de lumière polarisée, voilà une question qui n'est pas tranchée.

Selon Fresnel elles se font perpendiculairement au plan de polarisation ; selon Neuman et Mac Cullagh, elles se font sur ce plan même.

Le long des radiations électro-magnétiques, les vibrations transversales de l'éther doivent donc coïncider en direction avec la force électrique ou avec la force magnétique, selon que la réalité est dans l'hypothèse de Fresnel ou bien dans celle de Neuman.

Si l'hypothèse juste est la première, certaines considérations que je ne peux exposer ici, porteraient à établir que l'éther garde la même élasticité et prend des densités différentes dans les différents corps ; si l'hypothèse juste est la seconde, c'est la densité de l'éther qui reste constante et son élasticité qui varie.)

Il existe un moyen fort simple de reconnaître les radiations polarisées en un plan et leur plan de polarisation. L'expérience démontre que, tandis qu'une plaque métallique continue, qui n'est pas excessivement mince, est opaque aux radiations électro-magnétiques de quelque nature qu'elles soient, un treillis plan ou cylindrique de fils métalliques parallèles et suffisamment rapprochés agit de manière différente sur les radiations polarisées en un plan, selon la direction des fils.

Si l'on fait fonctionner un excitateur de Hertz de la forme primitive, c'est à dire composé par un conducteur droit de cuivre (du diamètre de 5 mm et long de 1m50)

soudé aux deux extrémités à deux sphères en zinc (du diamètre de 30 cm) et interrompu au milieu sur quelques millimètres, et si l'on place devant lui un treillis plan, soit perpendiculairement, soit obliquement, par rapport aux rayons de propagation, on peut remarquer qu'il affaiblit les perturbations électro-magnétiques sur le prolongement des rayons qu'il vient à couper.

Cet affaiblissement est maximum quand les fils du treillis sont parallèles au radiateur ; il est minimum quand ils lui sont perpendiculaires ; il a une valeur moyenne quand les fils ont une direction intermédiaire entre ces deux directions extrêmes.

De même, si l'on entoure le radiateur d'un treillis cylindrique, son action perturbatrice sur l'espace extérieur au treillis n'est pas sensiblement affaiblie, ou bien elle l'est profondément, selon que les fils se développent comme les parallèles ou bien comme les génératrices de la surface cylindrique interceptante.

Il résulte de certaines remarques faites ailleurs que le radiateur de Hertz produit des oscillations électro-magnétiques polarisées. On peut donc dire que le treillis est opaque ou transparent à des degrés différents pour ces radiations, selon que la force électrique présente ou ne présente pas de composante dans la direction de ses fils.

Ce fait dépend en partie de ce que cette composante donne lieu sur ces fils mêmes à une force électro-motrice d'induction qui engendre des courants électriques et cause une déperdition de l'énergie sous forme de chaleur dissipée.

Après avoir traversé le treillis, la force électrique est pour ainsi dire dépouillée de la composante qui a déjà travaillé, et la radiation a perdu une partie de son intensité. Ceci explique encore comment le treillis peut servir de

polariseur à une radiation ordinaire, puisqu'il se laisse traverser par la seule composante de la force électrique qui est perpendiculaire à ses fils.

Toutefois, le phénomène de l'opacité est peut être moins simple que l'explication précédente ne peut le faire croire. En effet, les fils du treillis, influencés par les oscillations électriques de l'excitateur, fonctionnent comme des résonateurs ; mais sur eux le courant oscillant induit (si l'on néglige les effets de la période propre différente) a une phase différente de celle du courant oscillant inducteur. Ces fils engendrent donc des radiations secondaires d'effet opposé, en partie, aux radiations de l'excitateur. Et cette circonstance aussi contribue à leur affaiblissement.

Une autre raison de ce fait est encore la réflexion. Dans les positions où le treillis est plus ou moins opaque, il peut servir à réfléchir les radiations électro-magnétiques ordinaires dans une proportion plus ou moins grande.

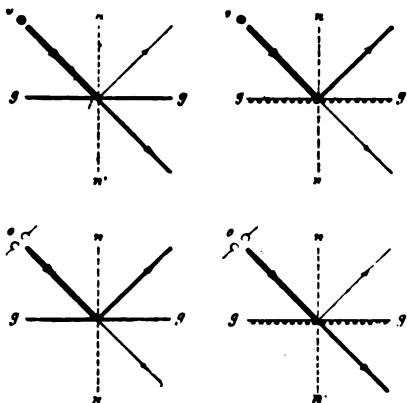


Fig. 15. — Transparence et réflexion des treillis.

De même, une plaque métallique continue réfléchit les radiations électro-magnétiques polarisées avec des moda-

lités différentes, selon certaines circonstances particulières. Les radiations réfléchies peuvent ensuite interférer avec les radiations directes et donner lieu, pour ainsi dire, à des espaces obscurs et à d'autres plus éclairés.

Il sera nécessaire de revenir sur cette question à un moment plus propice.

PROJECTEURS.

Dans l'optique des oscillations électro-magnétiques, tout comme dans l'optique ordinaire, il existe un artifice qui permet de réunir les radiations émanées dans toutes les directions par une source donnée, dans une région particulière et limitée de l'espace : il consiste dans l'emploi de projecteurs métalliques convenablement façonnés, non plus en argent ou en amalgame d'argent ou d'étain, mais tout simplement en cuivre, en laiton ou en zinc. A cause de la plus grande longueur d'onde des radiations, il n'est plus nécessaire que leur surface réfléchissante soit parfaitement lisse.

Si la source, de dimensions extrêmement petites, est presque réunie autour d'un point, on peut ramasser dans un cône circulaire de petite ouverture une grande partie de l'énergie totale qu'elle émane, en employant un miroir métallique en forme de paraboloïde de révolution, pourvu qu'on en fasse coïncider le foyer avec la source. Ainsi pourrait-on faire avec les petits excitateurs de M. Righi et leurs congénères.

Si la source a une des trois dimensions assez considérable et les deux autres plus exigües, on peut réunir dans un angle dièdre aigu une partie sensible de l'énergie totale rayonnée, en employant un miroir métallique en forme de cylindre parabolique, pourvu qu'on dispose la source le long de sa droite focale. Ainsi pourrait-on faire en utili-

sant la partie centrale des radiateurs de Hertz et avec les excitateurs ordinaires de M. Righi.

Ces miroirs, ou projecteurs, ou réflecteurs, devraient produire, à la rigueur, des ondes électro-magnétiques stationnaires, presque planes, et présentant des nœuds et des ventres fixes, qu'on devrait pouvoir reconnaître au moyen de résonateurs accordés avec le radiateur employé. Mais, soit qu'un excitateur produise une série d'ondes superposées de différentes fréquences, ainsi que le supposent MM. Sarasin et de la Rive, soit que les oscillations produites par un radiateur, soient affectées par un amortissement très rapide, ainsi que le pensent MM. Poincaré et Bjerkness, le fait est que l'on ne peut mettre en évidence, avec des résonateurs, qu'un nombre très petit de régions à intensité d'action maxima ou minima, et encore on ne parvient à bien les distinguer qu'à une distance très petite des projecteurs; de plus, elles ne sont pas également distancées dans l'espace.

La distance focale à préférer, dans la construction de ces miroirs, devrait être d'un quart ou de trois quarts de la longueur d'onde propre du radiateur; alors les rayons réfléchis renforceraient les rayons directs au plus haut degré; mais les circonstances spéciales qu'on vient d'indiquer diminuent beaucoup l'importance de cette disposition; c'est pourquoi il ne convient pas toujours pratiquement de l'adopter, et il est à préférer de donner aux projecteurs des dimensions qui facilitent matériellement les expériences.

ÉCRANS.

Il existe aussi un artifice qui permet de soustraire une région donnée de l'espace à l'action des radiations électro-magnétiques émanées par une source quelconque. Dans

ce but, il suffit de renfermer cette région de l'espace dans une enveloppe métallique continue, d'épaisseur suffisante. On a vu, en effet, que les corps conducteurs sont opaques à ces radiations, qu'ils préfèrent les réfléchir ou en absorber l'énergie, plutôt que de se laisser traverser par elles.

Le rapport entre la partie de l'énergie électro-magnétique, qui est réfléchie, et la partie de cette énergie, qui induit des courants dans la masse métallique et qui se transforme en chaleur, est variable d'après un grand nombre de circonstances. Mais, en tout cas, ces courants induits n'envahissent qu'une couche extérieure très petite de l'enveloppe — et d'autant plus petite que la fréquence des perturbations électro-magnétiques incidentes est plus grande, si elles sont oscillatoires. En outre, ces courants se distribuent d'eux-mêmes, de façon à n'avoir aucune action à l'intérieur de l'enveloppe, tant que celle-ci est absolument continue.

Mais, si l'enveloppe présente une ouverture, soit que les radiations électro-magnétiques qui ébranlent le milieu pénètrent par l'ouverture dans la cavité de l'enveloppe, soit que les courants électriques, induits par ces radiations sur la surface extérieure de l'enveloppe, s'y distribuent différemment ou bien, en contournant peut-être les bords de l'ouverture, se rejettent, en partie, sur la surface intérieure de l'enveloppe, toujours est-il que chaque point de la cavité ressent alors une action d'intensité différente selon les dimensions et la forme de l'ouverture.

Si l'ouverture a une forme approximativement circulaire, la perturbation intérieure est d'ordinaire assez peu sensible, même si la portion emportée de l'enveloppe a une certaine étendue ; mais si l'ouverture a la forme

d'une fente, la perturbation intérieure peut être très sensible, même si la portion de l'enveloppe qui manque pour la continuité parfaite est très restreinte et semble tout d'abord négligeable.

Ces circonstances, entrevues autrefois par M. Lodge, ont été confirmées, récemment, par M. Righi, au moyen d'expériences très soignées. (*Applaudissements.*)

(*A suivre*)

La séance est levée à midi et demi.

SÉANCE D'INAUGURATION DU LOCAL

26 FÉVRIER 1898



Ont signé la liste de présence : MM. Andouche, Andrews, Bardiaux, Batigne, Baudalet, Baudry, Bayet, Berger, Brandenburg, Briffaux, Centonze, Chaudoir, Compyn, Cons, Cousin, Crudenaire, De Bast, Decroës, de Grimouard, Della Riccia, Del Proposto, Deluca, Dubeltowicz, du Welz, Foucault, Gerard Emile, Gerard Eric, Henrion Albert, Jeanjean, Larmoyer, Le Brun Victor, L'Hoest Gustave, Mari, Martin Gabriel, Maternowski, Maus, Mavroidis, Mélotte, Micha, Micheels, Montefiore-Levi, Mugica, Neujean, Nicolini, Noirfalise, Nuzzaci, Ottavi, Quinaux, Raudot, Robert Paul, Sacerdotti, Schmidt, Tart, Van den Endt, van der Wallen, Van Dievoet, Van Musschenbroek, Viscidi.

MM. Alexis, Brouhon, Defalle, D'Heur, Forgeur, Kerstenne, Ledoux, Lefebvre, L'Hoest E., Lohest, Weber, Würth.

L'inauguration du local de l'Association s'est faite le 26 février par une petite fête intime présidée par M. Montefiore, président d'honneur. Salué à son arrivée par une longue salve d'applaudissements, M. Montefiore a pris place aussitôt au bureau, ayant à sa droite M. Eric Gerard, vice-président d'honneur, à sa gauche, M. Del Proposto, président.

Lorsque le silence fut rétabli, M. Del Proposto se leva et prononça l'allocution suivante :

Messieurs et chers Camarades,

Je suis certain d'interpréter les sentiments unanimes de l'Assemblée en remerciant Monsieur Montefiore d'être venu honorer de sa présence cette fête de famille.

L'inauguration du local de l'Association est certes pour nous un événement qui doit être acté dans nos annales; mais si nous y assistons si nombreux, c'est que nous y trouvons une occasion longtemps attendue de manifester nos sentiments de gratitude envers notre Président d'honneur. Nous espérons donner très-prochainement à cette manifestation de notre reconnaissance une forme plus durable, mais il nous est permis de rappeler aujourd'hui ce que l'Association doit aux conseils, aux encouragements et à l'appui de Monsieur Montefiore, ce que chacun de nous doit aussi à l'Institut qu'il a fondé.

Il y a quinze ans, M. Montefiore, prévoyant le développement actuel des applications de l'électricité, et pénétré de la nécessité de fournir à l'industrie électrique un personnel capable de la diriger et de la faire progresser, créa cet Institut qui porte son nom. Depuis lors, il n'a cessé de poursuivre le but élevé qu'il s'était proposé en prodiguant l'appui de sa générosité éclairée et sa haute personnalité à l'œuvre dont la direction fut confiée à M. le professeur Gerard.

Elle ne pouvait échoir à un maître de plus de valeur; nous savons tous comme il s'est acquitté de sa tâche d'une façon magistrale et comme il a su donner à l'Institut une réputation universelle.

De l'Institut Montefiore sont déjà sortis plusieurs centaines d'ingénieurs électriciens, qui, dispersés dans tous les pays de la terre, ont propagé au loin le renom de notre École. Chaque année, les élèves arrivent plus nombreux, et, malgré les agrandissements continus, les locaux dont dispose l'Institut n'en sont presque plus suffisants.

M. Montefiore peut être fier de son œuvre, elle passera à la postérité.

Notre Association fut fondée par quelques membres dévoués, trois ans après la création de l'Institut, et ses débuts furent difficiles. La bonne volonté des fondateurs se serait heurtée peut-être à des difficultés insurmontables, sans le secours illimité que M. Montefiore lui accorda. Il encouragea l'Association naissante en acceptant la présidence d'honneur, et lui procura du même coup l'appui moral des célébrités du monde scientifique, dont se compose la liste de nos membres honoraires.

En inaugurant aujourd'hui un local, à l'installation duquel M. Montefiore a bien voulu pourvoir entièrement, notre Association donne une preuve de sa prospérité croissante. Elle a acquis aujourd'hui une place enviée parmi les Sociétés scientifiques.

L'Institut Montefiore et l'Association sont invariablement liés dans leur destinée ; leur brillant succès est le digne couronnement des efforts de celui auquel sont adressés nos applaudissements, et dont la devise doit nous guider : *Avanti !*

M. Montefiore a répondu aussitôt à cette allocution du Président. Il s'est déclaré heureux et fier de se trouver parmi les membres de l'Association et les a remerciés de leurs applaudissements.

De tous les éloges que M. Del Proposto lui a adressés, il n'en retient qu'un seul : son grand dévouement à l'Institut et à l'Association et la vive affection qu'il leur porte.

Il a dit en quelques mots comment l'idée de la fondation d'un Institut électrotechnique avait germé en lui. « J'ai » eu la bonne fortune, a-t-il dit, de rencontrer un professeur tel que M. Eric Gerard pour organiser suivant » mes idées l'enseignement de l'Institut ; la grande situation qu'il s'est créée dans le monde scientifique en dit » plus que n'importe quel éloge je pourrais faire de lui.

» Tout l'honneur du renom et de la situation de l'Institut
» lui revient. Grâce à lui, notre École est et restera la
» première parmi les établissements similaires. »

Il a salué avec joie la fondation de l'Association et en a suivi les progrès avec le plus vif intérêt. Il félicite des beaux résultats obtenus tous ceux qui se sont dévoués à cette institution.

Entre autres avantages qui en résulteraient à son sens et non des moins importants, il entrevoyait une liaison en quelque sorte familiale entre les élèves de l'Institut qui, actuellement, étaient trop nombreux et trop occupés à l'Institut même pour connaître les camarades en dehors de ceux avec lesquels ils se trouvent en contact immédiat ; et il espérait que les Professeurs n'hésiteraient pas à encourager les élèves par leur présence occasionnelle, convaincu qu'une certaine intimité en dehors des cours ne pouvait qu'augmenter les sentiments d'affection et de respect des élèves pour leurs Professeurs. (*Longue salve d'applaudissements.*)

Aussitôt après ces discours, un groupe d'étudiants a tenu l'assemblée sous le charme d'un quatuor d'archets improvisé, sous la direction d'un camarade, M. Lefebvre. Ces messieurs ont exécuté en artistes consommés la *Suite d'Holberg*, de Grieg, le *Chant triste*, de Tchaïkowski, le *Quatuor*, d'Ewald, le *Prélude du Déluge*, de Saint-Saëns, et la *Gavotte*, de Popper, exécutée par notre camarade M. Würth.

Nous sommes heureux de trouver ici l'occasion d'adresser nos plus chaleureux remerciements à ces jeunes camarades, dont le concours a ajouté à la cordialité de notre réunion intime tout l'attrait d'une fête artistique.

SÉANCE DU 27 FÉVRIER 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Aragon, Baleste, Batigne, Baudry, Bayet, Bodde, Boubnoff, Briffaux, Bronne, Centonze, Chaudoir, Cheftel, Compyn, Cortivo, De Bast, de Grimouard, Della Riccia, Del Proposto, de Meeus, de Metz, de Nonancourt, Foucault, Francken, Gerard Emile, Gerard Eric, Gielen, Henrion Albert, Herzen, Ivanoff, Jakouboff, Larmoyer, Leguillon, L'Hoest, Luraschi, Manzoni, Mari, Maternowski, Maus, Melotte, Micheels, Modigliani, Moens, Montefiore-Levi, Mugica, Nicolini, Nuzzaci, Ottavi, Polivanoff, Quinaux, Raudot, Riboni Carlo, Robert Paul, Roland, Roussakoff, Schiesari, Schmidt, Schopoff, Vandecastelle, Van Musschenbroek, Viscidi, Wilkin, Zocchi.

MM. Brouhon, D'Heur, Forgeur, Ledoux, Lohest, Weber.

M. Montefiore, président d'honneur, au fauteuil.

La parole est donnée à **M. Della Riccia** pour la communication de son étude sur

Les ondes électro-magnétiques et la télégraphie sans fil

2^e PARTIE.

EXAMEN CRITIQUE DES APPAREILS.

Ayant ainsi terminé l'examen sommaire du fonctionnement des appareils de M. Marconi, l'exposition du rôle de l'éther dans la propagation des ondes électro-magnétiques et l'indication succincte des lois qui régissent cette propagation et l'action de ces ondes, j'aborderai l'examen critique des dispositifs de M. Marconi et l'aperçu des modifications dont ils seraient susceptibles. Je déclare que

plusieurs des idées que j'exposerai, à défaut de recherches expérimentales directes et de recherches analytiques avisées, n'ont pas un fondement bien certain ; la pratique en sanctionnera peut-être quelques-unes et en rejettera d'autres. Mais mon intention est tout simplement d'attirer sur certains sujets l'attention de personnes plus compétentes que moi, afin que la nouvelle application puisse bientôt bénéficier de leur enseignement.

APPAREILS DES STATIONS.

Chaque station télégraphique doit comprendre, dans la pratique, un appareil de transmission et un appareil de réception. Or, le récepteur contient des organes très sensibles qui peuvent être indûment sensibilisés par l'action de champs magnétiques variables d'une certaine intensité, comme celui qui est produit par une bobine d'induction. Toutes les fois qu'on ne voudra pas se servir d'une machine à influence pour charger le radiateur, il faudra donc au moins envelopper un des deux appareils dans un écran magnétique. Le mieux est certainement d'envelopper le récepteur dans une boîte en tôle de fer qui renferme tous les électro-aimants et qui ne laisse au-dehors que le résonateur et les organes purement mécaniques, utilisés pour l'enregistrement. On pourrait ainsi se passer des résistances non inductives destinées à entraver les effets sensibles des extra-courants locaux sur le circuit de réception, l'écran magnétique servant en même temps comme écran électro-magnétique.

A ce propos, voici quelques renseignements que j'ai eu de M. Marconi, et qui se rapportent à une série d'expériences faites entre l'île de Wight et la côte anglaise.

« Aux deux stations, les appareils sont placés dans une »
» chambre et le fil (que nous qualifierons d'aérien) passe »
» par un trou percé dans la fenêtre. Dans chaque station, »
» on emploie un transmetteur et un récepteur placés l'un »
» sur l'autre et sur la même table. L'appareil récepteur »
» est renfermé dans une caisse métallique (pour l'abriter »
» contre l'action puissante de l'oscillateur). C'est au »
» moyen d'une manivelle que l'on fait communiquer le fil »
» qui va à la terre et le fil aérien, tour à tour avec l'oscil- »
» lateur, quand on veut envoyer des dépêches, et avec le »
» récepteur, quand on doit en recevoir. »

CIRCUITS D'ALIMENTATION ET DE CHARGE.

L'énergie électrique nécessaire à la transmission peut s'obtenir, en général, par différents procédés.

La durée de chaque décharge oscillante du radiateur est toujours très courte. Pour avoir des perturbations qui puissent servir sans incertitude à former des signaux télégraphiques, il faut donc produire un très grand nombre de décharges en peu de temps. C'est pour cela qu'on emploie une bobine d'induction qui est apte à renouveler la charge plusieurs dizaines de milliers de fois par seconde ; mais à sa place, on peut aussi employer une machine à influence, pourvue ou dépourvue de condensateur, ainsi que l'ont déjà fait MM Toepler et Righi. Cette disposition évite, comme je l'ai déjà indiqué, la production d'un champ magnétique qui pourrait nuire aux instruments du récepteur de la station.

Dans le cas où l'on se servirait d'une bobine d'induction, il conviendrait que l'interrupteur qui fractionne son courant primaire, fut indépendant et fonctionnât continuellement. On éviterait ainsi, dans l'émission des signaux, le retard que produit l'inertie d'un interrupteur ordinaire-

ment immobile et commandé par le courant même qui doit produire les signaux.

En tout cas, il sera toujours avantageux de mettre en action la plus grande quantité d'énergie, en employant des accumulateurs et des bobines, ou bien des moteurs et des machines à influence de la plus grande puissance ; car les causes de déperdition de l'énergie rayonnée par l'excitateur sont multiples. Sans parler de l'absorption du milieu (qui est déterminée par une loi exponentielle), on doit toujours tenir compte de ce fait que l'énergie s'évanouit dans l'espace, dont elle envahit à chaque instant une portion croissante. J'ai déjà eu l'occasion de dire que chaque couronne sphérique d'égale épaisseur qui s'ébranle autour de la sphère précédemment ébranlée, a un volume croissant à peu près comme le carré de son rayon moyen.

M. Marconi a encore essayé l'emploi d'autres générateurs.

Dans une série d'expériences faites à Dower, écrit-il, « à la place de la bobine de Ruhmkorff, on s'est aussi » servi de l'appareil de M. Tesla, ainsi que de la bobine » à huile de Thomson, mais aucun de ces appareils n'a » fourni d'aussi bons résultats que ceux que l'on a obtenu » nus avec une bobine d'induction ordinaire. »

Si l'on pense que la durée de l'amortissement des oscillations dans le radiateur peut être moindre que les intervalles entre les charges, quand on emploie une bobine d'induction ordinaire, et peut être plus grande que ces intervalles quand on emploie une source de flux alternatifs plus rapides, on peut voir une explication de ce résultat dans un désaccord possible entre la direction du mouvement électrique résiduel dans le radiateur et la direction du mouvement électrique imprimé par la source.

Pour se rendre compte de ce fait, il suffit de penser à un pendule battant la seconde par oscillation complète, et de supposer qu'il est frappé par un marteau, dans un même sens, à des intervalles proches d'un nombre impair de demi-secondes.

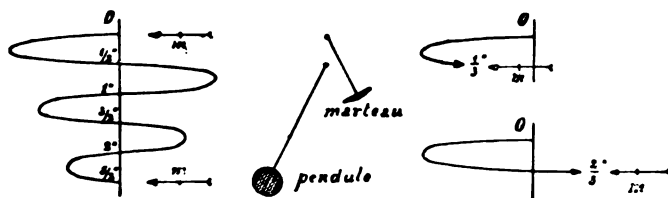


Fig. 16 — Action d'un marteau sur un pendule.

Une autre explication pourrait se trouver dans l'incapacité du radiateur, à période propre relativement lente, à admettre des oscillations induites rapides.

Pour se rendre compte de ce fait, il suffit de penser encore au même pendule, et de supposer qu'il est frappé par un marteau, dans un même sens, trois fois par seconde ou trois fois sur deux secondes. On voit que l'oscillation résiduelle et la nouvelle impulsion sont antagonistes.

CIRCUIT D'OSCILLATION. — PÉRIODES DES MOUVEMENTS ÉLECTRIQUES.

Il est évident qu'il n'est pas indispensable que les perturbations électro-magnétiques à produire pour la correspondance soient régulièrement périodiques. Les oscillations produites par des décharges électriques ne le sont pas non plus à cause de l'amortissement qui fait varier l'amplitude, si ce n'est la période. Mais l'irrégularité pourrait être plus accentuée : on pourrait produire au même but des séries d'extra-courants. La nature intime

du phénomène n'en serait pas différente, tout comme une rumeur désordonnée n'est pas un phénomène acoustique essentiellement différent d'une note musicale.

A la vérité, comme la force électro-motrice d'induction dépend de la *variabilité* du courant inducteur, ce qu'il faut faire c'est produire des courants extrêmement variables.

Si la variation du courant inducteur était une augmentation ou une diminution continuelle, on atteindrait en très peu de temps de telles intensités de courant que la sûreté de fonctionnement et l'économie du système en seraient compromises. Il faut donc que la variation change de signe, c'est à dire que le courant augmente et diminue alternativement.

Si, parmi les courants de telle forme, on préfère ceux dont la valeur aussi change régulièrement de signe, et si parmi ces courants appelés alternatifs on choisit les courants oscillants de décharge des condensateurs (dont l'amplitude décroît suivant une loi exponentielle) cela résulte de la circonstance que ces derniers courants peuvent s'obtenir avec les artifices les plus commodes et peuvent atteindre de très hautes variabilités.

En outre, ces courants permettent d'assigner aux ondes électro-magnétiques qu'ils produisent un certain caractère de polarité qui peut être très favorable à leur transmission à de grandes distances, comme on le verra plus loin

On voit de suite que la variabilité d'un courant alternatif, c'est à dire le taux moyen de la variation de son intensité par rapport au temps, croît avec la fréquence et avec l'amplitude de ses oscillations.

Or, les radiateurs engendrent, en général, des oscillations de fréquence d'autant plus grande que leurs dimensions sont plus petites, car alors leur capacité électro-statique et leur self-induction sont aussi petites.

Mais, à égalité de différence de potentiel produite dans la charge, la quantité d'électricité mise en mouvement pendant la décharge varie dans le même sens que la capacité électro-statique du système. C'est donc aussi dans ce sens que varie l'amplitude du courant oscillant de décharge, amplitude qui décroît entre le ventre et les nœuds des oscillations stationnaires produites et dont je considérerai une valeur moyenne.

Partant, en même temps que l'on tâche d'augmenter la fréquence d'un tel courant, on en diminue l'amplitude moyenne ; et tandis que la première circonstance est favorable à l'accroissement de la variabilité, la seconde lui est contraire.

Même en négligeant le mode de distribution de la capacité dans le radiateur (ce qui détermine la loi de variation de l'amplitude du courant entre le ventre et les nœuds des oscillations stationnaires), on ne peut donc pas établir *à priori*, la force électro-motrice de charge qui détermine la différence de potentiel initiale entre les deux moitiés du radiateur étant donnée, s'il conviendrait d'élever la fréquence ou de rehausser l'amplitude moyenne pour produire la force électro-motrice d'induction maxima.

Il se pourrait même que l'énergie électro-magnétique répandue par le radiateur dans le milieu ambiant destiné à la transmettre fut maxima pour une certaine valeur discrète de la fréquence et de l'intensité correspondant à des dimensions déterminables pratiquement par des tâtonnements.

Je dirai plus loin ce que les expériences de M. Marconi ont démontré à ce sujet, en parlant de la hauteur du conducteur aérien annexé au radiateur. En attendant, je donnerai un aperçu des fréquences des oscillations que l'on pouvait obtenir avec les appareils qui furent essayés

à la Spezia, selon leurs différents modes d'emploi, d'après certains calculs que j'ai faits en me basant sur des hypothèses bien simplificatives, car les calculs rigoureux sont impossibles dans presque tous les cas qui se présentent en pratique, et les calculs seulement approchés sont déjà bien souvent très difficiles.

Je suppose que la distance entre les boules centrales est toujours d'environ 1 mm et que les conducteurs ont à peu près 4 mm de diamètre.

1^o Si l'on employait les deux boules pleines à la manière de M. Righi, c'est à dire en interposant des couches de diélectrique plus épaisses entre ces boules et les conducteurs latéraux, les oscillations dont le petit système central serait seul le siège, pourraient atteindre une fréquence de 1 000 millions par seconde. Telle est peut-être la fréquence d'un des flux secondaires que j'ai dit pouvoir être engendrés dans le radiateur, si effectivement une partie de l'électricité mise en mouvement ne réussit pas à franchir les deux interruptions latérales de l'excitateur.

2^o Si l'on faisait fonctionner le radiateur de M. Marconi sans conducteurs additionnels, en admettant que les oscillations n'envahissent pas sensiblement les conducteurs qui relient les tiges de laiton à la bobine d'induction, ces oscillations pourraient avoir, dans ce système moyen, une fréquence d'environ 250 millions par seconde.

3^o Dans un circuit d'oscillation bien plus grand, composé des quatre boules, d'un conducteur aérien de 34 mètres sans plaque de zinc et d'un conducteur inférieur de 6 mètres non relié à la terre, les ondes électriques se borneraient à une fréquence de $3\frac{1}{2}$ millions par seconde, fréquence que l'on verrait encore probablement diminuer, si l'on tenait compte des capacités négligées.

Mais, même en admettant que le radiateur puisse être parcouru par des ondes électriques de fréquences différentes, on doit croire que les plus efficaces sont les plus lentes ; car il est certain que l'apposition des conducteurs additionnels, aérien et à la terre, augmente beaucoup la puissance de l'appareil et que cette puissance croît encore, au moins jusqu'à un certain point, avec la longueur du conducteur aérien. En conclusion, on voit que les oscillations les plus actives rayonnées par l'excitateur de M. Marconi ont une fréquence bien moindre que les plus hautes fréquences que l'on peut se procurer au moyen d'autres radiateurs.

Je note en passant que, si l'on admet que la vitesse de propagation des perturbations électro-magnétiques dans l'éther libre ou dans l'air sont de 300 millions de mètres par seconde, les oscillations indiquées ci-dessus, et dont la fréquence est de 1 000, 250 et $3\frac{1}{2}$ millions de périodes par seconde, ont respectivement des longueurs d'onde de 0^m30 , 1^m20 et 90^m environ.

Partant, à chaque oscillation électrique complète effectuée dans le circuit d'émission du transmetteur, une nouvelle onde électro-magnétique de propagation, d'une profondeur *certainement plus grande que 90 m*, se répand dans le milieu environnant.

On peut se persuader que l'appellation de radiateur doit s'appliquer à tout le système des quatre boules et des deux conducteurs additionnels par les considérations suivantes :

Il n'y a pas de doute qu'un radiateur borné aux deux boules pleines, séparées par une couche diélectrique de moins d'un millimètre d'épaisseur, ne pourrait engendrer des oscillations d'une longueur d'onde dépassant 40 cm.

En dehors des résultats des calculs, cela peut résulter d'une comparaison de ce radiateur avec les radiateurs similaires que M. Righi emploie couramment, et qui, se composant de deux boules pleines de 4 $\frac{1}{2}$ et de 8 cm, fournissent des ondes de 10 $\frac{1}{2}$ et de 20 cm.

Or, on doit croire que dans les expériences faites par M. Preece en Angleterre, on a trouvé que le radiateur de M. Marconi engendrait des ondes de 1^m20.

Mais cette longueur d'onde, selon les calculs, appartiendrait au système composé des quatre boules et des deux tiges en laiton qui aboutissent aux deux boules latérales; et c'est précisément avec un système semblable, sans conducteurs additionnels et pourvu d'un projecteur, que l'on fit les essais qui donnèrent le résultat indiqué.

On peut donc conclure que, pendant ces essais, les tiges métalliques latérales prenaient part au phénomène électrique oscillatoire.

Et cela ne doit pas étonner, si l'on pense que lorsque les deux interruptions latérales, entre les grosses boules pleines et les petites boules vides, sont franchies par les étincelles produites par la décharge du secondaire de la bobine, ces deux interruptions n'opposent plus, effectivement, aux courants extrêmement variables, qu'une résistance assez petite, quoiqu'elles aient une longueur d'un centimètre environ. C'est pourquoi les oscillations électriques engendrées dans les deux boules pleines peuvent s'étendre sur les deux boules vides et se propager dans les tiges de laiton qui y aboutissent. Elles n'envahissent pas sensiblement, en tout cas, le secondaire de la bobine à cause de sa grande impédance.

Une extension pareille ne s'accomplit peut-être pas dans les expériences de M. Righi; mais cela tient à l'intervalle beaucoup plus grand que ce physicien ménage entre les boules du milieu et les boules latérales.

Une fois admise, cette extension, si l'on imagine ensuite qu'on ajoute au radiateur les deux conducteurs additionnels, on ne voit rien qui s'oppose à ce que le mouvement électrique déterminé au centre du système s'étende encore à ces deux appendices : aucune discontinuité métallique n'entrave cette fois le chemin des flux oscillants.

A égalité de différence de potentiel de charge, en accroissant d'une part la capacité du radiateur, ces conducteurs additionnels augmenteront la quantité d'électricité se déplaçant à la décharge ; en accroissant d'autre part la capacité et la self-induction de l'excitateur, ces mêmes conducteurs diminueront la fréquence des oscillations qui peuvent se produire dans le système

En variant la longueur de ces conducteurs on pourra donc peut-être atteindre une condition particulière qui confère l'efficacité maxima au radiateur.

L'expérience démontre qu'en ajoutant ces conducteurs complémentaires à l'excitateur on produit réellement une modification des oscillations qui est favorable à leur transmission à de grandes distances. En effet, sans ces conducteurs, la distance de transmission des ondes est très restreinte, même en employant des projecteurs ; tandis qu'avec ces conducteurs, la correspondance peut avoir lieu à des distances considérables.

Il est donc certain que ces conducteurs additionnels font partie du circuit d'excitation, c'est à dire du radiateur. Que leur présence dans ce circuit produise une variation de fréquence des oscillations, cela résulte du fait qu'un projecteur capable d'augmenter l'efficacité de l'excitateur limité aux quatre boules et aux deux tiges, perd cette faculté dès qu'on ajoute les deux conducteurs. Que cette variation de fréquence soit une diminution, et même bien grande, cela est indirectement prouvé par la plus grande

diffRACTIBILITÉ des nouvelles radiations vis-à-vis des radiations primitives, phénomène correspondant à l'aptitude plus grande des rayons rouges par rapport aux rayons violets, de pénétrer dans les cônes d'ombre produits par des corps opaques.

Il me semble que ces considérations, quoique un peu vagues, peuvent suffire à justifier l'extension de l'appellation de radiateur à tout le système des quatre boules et des deux conducteurs, aérien et à la terre.

LA MEILLEURE POSITION POUR LE CONDUCTEUR AÉRIEN.

J'ai dit que l'augmentation de la distance utile de transmission que l'on obtient par l'addition des deux conducteurs complémentaires, est due, en partie, à l'augmentation de la capacité du système, circonstance qui, en donnant lieu à de plus grandes amplitudes de courant, permet, jusqu'à un certain point, une plus grande production d'énergie électro-magnétique. On peut croire cette assertion confirmée par le fait, que cette distance utile croit encore avec la longueur du conducteur aérien. Mais pourtant, il y a d'autres manières d'augmenter la capacité du système qui n'accroissent pas la distance de transmission. Il y a même une manière d'augmenter la capacité du système qui fait diminuer la distance de transmission. Ainsi, si l'on incline le conducteur dressé auparavant à peu près verticalement dans l'atmosphère, en l'approchant de l'horizontale, sans varier sa longueur, on constate une diminution de la distance de transmission; et pourtant, l'on sait, que cette opération doit apporter une augmentation dans la capacité du système, comme lorsque l'on rapproche les deux armatures d'un condensateur, l'armature opposée au fil aérien étant dans ce cas la terre même, à laquelle la moitié inférieure du radiateur est reliée.

En outre, pour des positions du conducteur aérien, intermédiaires entre la verticale et l'horizontale, on constate des distances utiles de transmission intermédiaires, mais variables en sens contraire de la capacité. On doit donc conclure que l'efficacité du conducteur aérien dépend encore de quelque autre cause qui se modifie avec la *direction* du conducteur même.

La nature des directions particulières — verticale et horizontale — qui ont donné lieu aux observations extrêmes, et le caractère topographique du théâtre sur lequel on a fait ces observations — la mer, dont la surface sert même de définition à ces directions — donnent immédiatement l'idée de rechercher la cause de la différente efficacité du radiateur selon sa position, dans l'intervention du conducteur naturel indéfini, qui est constitué par la mer.

Ceci posé, on remarque de suite que les flux électriques qui se produisent dans le conducteur aérien, qui est long, mince et à peu près rectiligne, engendrent une force électrique qui est constamment parallèle à la direction moyenne du conducteur, et partant approximativement verticale ou horizontale, selon que ce conducteur est dressé verticalement ou tendu horizontalement dans l'atmosphère.

En d'autres termes, on voit que les radiations émanées par ce conducteur sont polarisées dans des plans différents, et l'on est ainsi conduit à rechercher si le phénomène indiqué tantôt ne dépend pas, parfois, d'une aptitude différente des rayons réfléchis dans les deux circonstances.

En suivant cet ordre d'idées, j'ai pu me persuader qu'il en est vraiment ainsi. Pour exposer mes conclusions, je commencerai par rappeler certains faits que l'on rencontre dans l'optique ordinaire, en étudiant la réflexion

sur la surface de séparation de deux milieux transparents de pouvoirs réfringents différents et sur la surface des métaux.

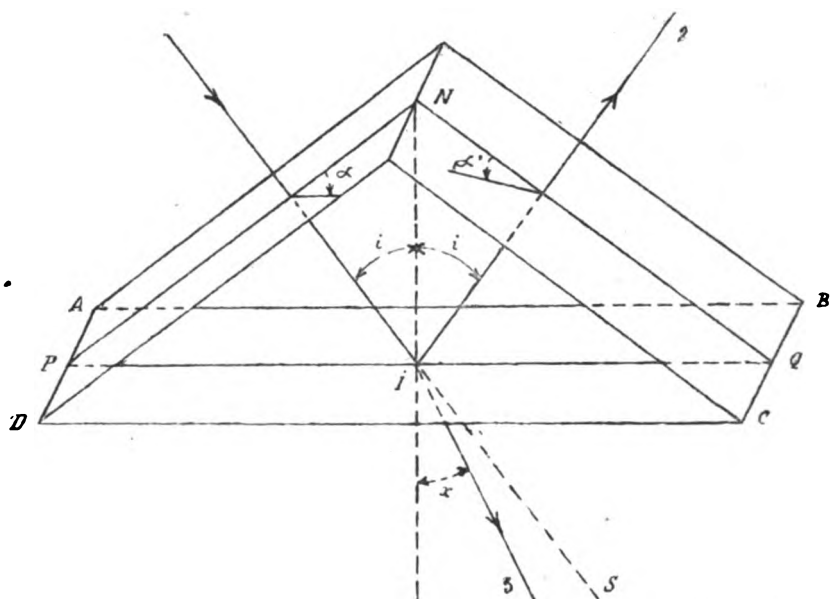


Fig. 17. — Réflexion des rayons polarisés.

- ABCD plan de réflexion.
- PQN plan d'incidence.
- IN normale.
- 1I rayon incident.
- 12 rayon réfléchi.
- I3 rayon réfracté.
- IS prolongement du rayon incident.

Au premier abord, on pourrait croire que les mouvements de l'éther en chaque point d'un rayon réfléchi par une surface polie, sont les mêmes que ceux qui auraient lieu au point correspondant du prolongement du rayon

incident qui se trouve supprimé, c'est à dire au point symétrique, par rapport à la surface réfléchissante, si la perturbation éthérique pouvait y parvenir. En d'autres termes, on pourrait croire que le rayon réfléchi n'est autre chose que le prolongement du rayon incident, auquel on aurait fait accomplir une rotation autour d'un axe placé dans le plan du miroir (plan de réflexion) et perpendiculaire au plan contenant le rayon incident et la normale au miroir (plan d'incidence).

Mais, en général, il n'en est pas ainsi. Des phénomènes spéciaux, infirmant cette supposition, ont lieu au point d'incidence. Sans m'arrêter sur ces phénomènes, qui sont peut-être susceptibles d'avoir une explication plus facile dans l'optique des oscillations électro-magnétiques que dans l'optique des radiations lumineuses, je dirai que le résultat de leur action est pour ainsi dire une rotation du rayon lumineux sur lui-même. Après quoi, je considérerai deux cas particulièrement importants; deux cas extrêmes que je dois envisager pour arriver à mon but.

Je déclare avant tout que, pour éviter toute complication, je suppose le milieu contenant le rayon réfracté, plus réfringent que le milieu contenant le rayon direct et le rayon réfléchi, et l'angle d'incidence i très proche de 90° (incidence rasante).

Si le rayon lumineux incident est polarisé dans un plan normal au plan d'incidence ($\alpha = 90^\circ$) — ainsi qu'un rayon électro-magnétique sortant d'un excitateur linéaire perpendiculaire au plan de réflexion — le rayon réfléchi peut être vraiment envisagé comme le prolongement du rayon direct dévié dans le plan d'incidence. Le plan de polarisation de ce nouveau rayon est encore normal au

plan d'incidence ($\angle' = 90^\circ$). Seulement, l'intensité du rayon réfléchi est sensiblement moindre que celle du rayon incident.

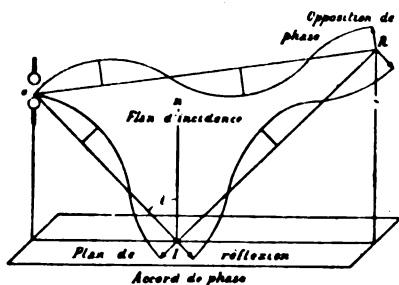


Fig. 18. — Oscillations électriques dans le plan d'incidence ; différence de longueur : une demi-onde.

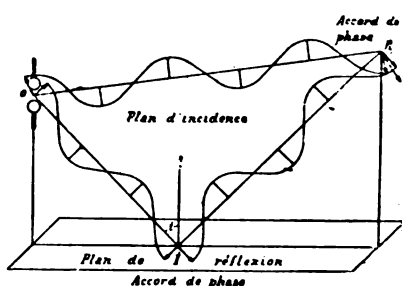


Fig. 19. — Oscillations électriques dans le plan d'incidence ; différence de longueur : deux demi-ondes.

Mais, si le rayon lumineux incident est polarisé dans le plan d'incidence même ($\angle = 0^\circ$) — ainsi qu'un rayon électro-magnétique sortant d'un excitateur linéaire parallèle au plan de réflexion — le rayon réfléchi présente en chaque point des conditions pour ainsi dire opposées aux conditions qu'aurait présenté le prolongement du rayon direct au point correspondant, comme si la déviation dans le plan d'incidence avait été accompagnée d'une rotation de 180° du rayon sur lui-même ($\angle' = 180^\circ$). Donc, dans ce second cas, en redressant le rayon brisé au point d'incidence, par un simple mouvement dans le plan d'incidence, on ne parvient plus à reconstruire (comme dans le cas précédent) un rayon continu ; mais on vient à former un rayon manquant d'une demi-longueur d'onde au point d'incidence. Par contre, dans ce cas, le rayon n'a pas beaucoup perdu de son intensité par l'effet de la réflexion.

(Comparer les figures 18 et 19 relatives au premier cas, avec les figures 20 et 21 relatives au second)

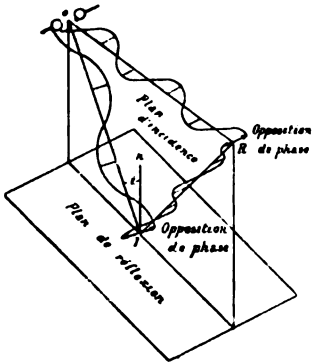


Fig. 20. — Oscillations électriques perpendiculaires au plan d'incidence ; différence de longueur : deux demi-ondes.

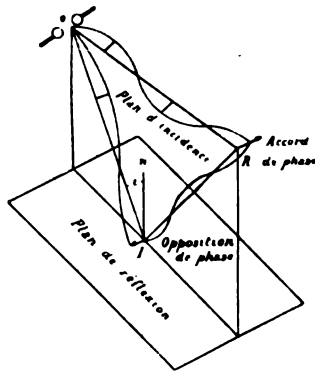


Fig. 21. — Oscillations électriques perpendiculaires au plan d'incidence ; différence de longueur : une demi-onde.

Sur ces deux remarques repose l'explication que je vais donner de la différente efficacité du conducteur placé verticalement ou horizontalement.

C'est un fait bien connu que dans certaines conditions, les rayons réfléchis par une surface spéculaire, peuvent altérer les effets des rayons directs. Avec le langage de l'optique ordinaire, l'interférence par réflexion peut donner lieu à des régions obscures et à des régions doublement éclairées, selon que l'action du rayon réfléchi est discordante ou concordante avec celle du rayon direct, au point de concours. Cette vérité, matériellement démontrée depuis longtemps pour les radiations lumineuses, au moyen de certaines expériences imaginées par Fresnel, doit aussi subsister pour les oscillations électro-magnétiques.

Pour que deux rayons émanés d'une même source, l'un direct, l'autre réfléchi, agissant sur un même point de concours, annulent l'action l'un de l'autre ou bien la redoublent, il faut que plusieurs conditions soient satisfaites. Il est nécessaire, avant tout, que les deux rayons, procédant dans le même sens, se rencontrent sous un angle très petit. Dans tout autre cas, la vitesse de la particule de l'éther qui se trouve au point de concours, s'il s'agit d'un rayon lumineux, ou bien les forces électrique et magnétique, s'il s'agit d'un rayon électromagnétique, acquièrent une direction résultante intermédiaire entre les deux directions composantes et une valeur différente de la différence ou de la somme des deux valeurs composantes.

L'annulation ou le redoublement de la perturbation se fait en outre d'autant plus parfaitement que la réflexion diminue moins sensiblement l'intensité du rayon.

Ensuite, à cause de ce que nous avons vu s'accomplir sur la surface spéculaire, près du point d'incidence :

1° Lorsque le plan de polarisation est normal au plan d'incidence — c'est à dire quand les oscillations électriques ont lieu parallèlement à ce plan, comme dans le cas où le radiateur est pourvu d'un *conducteur aérien vertical* — on a au point de concours une perturbation *minima* (obscurité) si la longueur totale du rayon réfléchi, qui est brisé, surpasse celle du rayon direct, qui est continu, d'un nombre *impair* de demi-longueurs d'onde ; tandis que l'on a au même point une perturbation *maxima* (éclairage double) si la longueur totale du rayon réfléchi surpasse celle du rayon direct d'un nombre *pair* de demi-longueurs d'onde.

Ainsi, en particulier, si la différence de longueur des deux rayons est comprise entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ longueur d'onde,

l'ébranlement de l'éther est diminué, d'autant plus que cette différence se rapproche de la seconde limite (une demi-longueur d'onde) ; si, au contraire, elle est comprise entre 0 et $\frac{1}{4}$ longueur d'onde, l'ébranlement de l'éther est augmenté, d'autant plus que cette différence se rapproche de la première limite (zéro demi-longueur d'onde).

Les deux circonstances extrêmes qu'on vient d'indiquer sont représentées respectivement par les fig. 18 et 19.

2° Au contraire, lorsque le plan de polarisation coïncide avec le plan d'incidence — c'est à dire quand les oscillations électriques s'accomplissent à peu près normalement à ce plan, comme dans le cas où le radiateur est pourvu d'un *conducteur aérien horizontal* — on a au point de concours une perturbation *minima* ou *maxima* selon que la longueur totale du rayon réfléchi surpasse celle du rayon direct d'un nombre *pair* ou *impair* de demi-longueurs d'onde.

Ainsi, en particulier, on a un éclaircissement moindre ou plus fort que l'éclaircissement moyen dans les régions où se croisent des rayons directs et des rayons réfléchis présentant une différence de longueur plus petite ou plus grande qu'un quart de longueur d'onde. L'amointrissement ou le renforcement de l'éclaircissement est d'autant plus accentué que cette différence se rapproche de zéro (nombre pair) ou de une (nombre impair) demi-longueur d'onde.

Ces deux autres circonstances extrêmes sont représentées respectivement par les fig. 20 et 21.

Lorsque l'angle d'incidence n'est pas très proche de l'angle droit (comme on l'a supposé jusqu'ici) les résultats de l'interférence des rayons réfléchis avec les rayons directs diffèrent quelque peu, les phénomènes indiqués

s'étend horizontalement, sont des nappes hyperboloïdiques de rotation autour d'un axe vertical, avec le foyer au point considéré et avec le sommet à une distance de la surface réfléchissante, égale à la moitié de la différence de longueur qui doit exister entre le rayon direct et le rayon réfléchi pour qu'il en résulte l'effet considéré.

Il faut encore négliger la partie de ces nappes qui se trouve près de l'axe, parce que, dans cette région, les rayons direct et réfléchi se rencontrent sous un angle obtus, ou bien sous un angle qui n'est pas suffisamment petit pour que l'interférence donne des effets bien marqués.

Les couches obscures et doublement éclairées résultant de l'interférence par réflexion se présentent dans un ordre différent selon la manière suivant laquelle les radiations incidentes (et partant les radiations réfléchies aussi) sont polarisées. Si l'on considère comme points de concours des points très proches de la surface réfléchissante, on voit que la différence de longueur entre les rayons directs et les rayons réfléchis qui y aboutissent est très petite, et, si la longueur d'onde est suffisamment grande, on peut dire que cette différence de longueur est très voisine de zéro (nombre pair) demi-longueur d'onde.

Partant, si les ondulations sont polarisées dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence (cas du conducteur aérien vertical), on a au contact de la surface réfléchissante une zone doublement ébranlée; si les ondulations sont polarisées dans le plan d'incidence même (cas du conducteur aérien horizontal), on a au contact de la surface réfléchissante une zone qui n'est presque nullement ébranlée.

Ensuite, les couches pour ainsi dire sombres et doublement éclairées se suivent alternativement.

En résumé, on a dans le premier cas des franges d'interférence à centre lumineux, et dans le second cas des

franges d'interférence à centre obscur ; et cette partie centrale, claire ou sombre, est celle qui se trouve au voisinage immédiat du plan de réflexion.

En dehors des surfaces obscures et doublement éclairées, il y a encore lieu de considérer les surfaces de passage entre les zones claires et les zones sombres. Ce sont également des nappes d'hyperboloïdes de rotation.

Si la source rayonnante n'était qu'un point, le premier passage entre une région plus ébranlée et une région moins ébranlée (ou vice-versa selon le cas que l'on considère), s'accomplirait le long de la nappe supérieure d'un hyperboloïde de rotation dans lequel la distance des sommets, qui représente la différence de longueur entre le rayon direct et le rayon réfléchi, serait *un quart de longueur d'onde*.

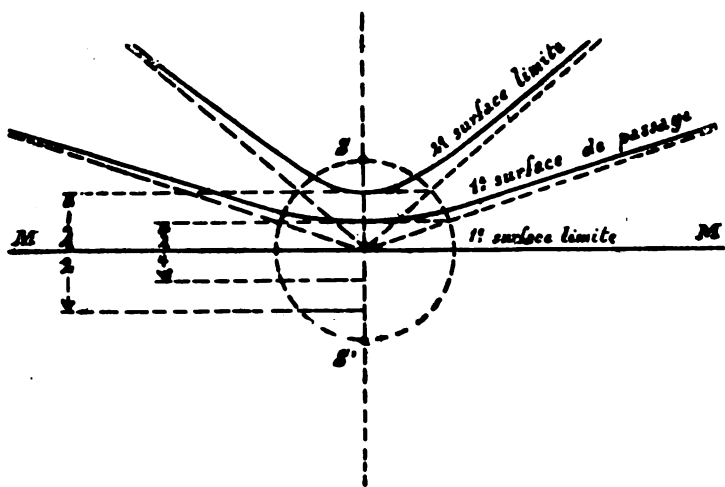


Fig. 23 — Franges d'interférence.

Bornons nos considérations aux deux premières couches à caractéristiques opposées et à la première

surface de passage seulement (fig. 23). Appliquons ce que je viens de dire aux oscillations rayonnées par un excitateur télégraphique de M. Marconi, en supposant que la longueur d'onde des radiations ne soit pas plus grande que 90 m. Je me restreins à cette dimension, qui, selon mon avis, est une limite inférieure, pour me mettre dans les pires conditions en vue des conclusions que je veux tirer.

Comme le sommet de la surface hyperboloïdique de passage ou de séparation des couches à caractéristiques opposées, doit se trouver à une distance de la surface de la mer égale à un huitième de longueur d'onde, il sera placé à une hauteur de 11^m25 environ.

Que l'on remarque que les conducteurs aériens du radiateur télégraphique, bien loin d'être des sources très petites, peuvent atteindre des dimensions considérables ; il ne peut donc exister, à vrai dire, aucune *surface* de séparation ou de passage ; chaque point du conducteur, considéré comme source rayonnante, a une surface de séparation propre, de forme et de dimensions dépendant de sa position à lui ; il faudrait donc plutôt parler de *région neutre*. Mais, pour mon but, il me suffira de considérer les surfaces de séparation relatives à quelques points isolés. Supposons donc qu'aucun point de la source des perturbations n'excède la hauteur de 25 m au dessus de la surface de la mer qui fonctionne comme surface réfléchissante horizontale. Un point à la hauteur de 35 m aurait pour surface de passage une nappe d'hyperboloïde de révolution autour de la verticale passant par le point donné et ayant le foyer à 35 m et le sommet à 11^m25 ; cette surface s'élèverait tout autour de l'axe en se rapprochant d'un cône asymptotique, dont les génératrices font avec

la verticale un angle ayant pour cosinus $\frac{11,25}{35}$, soit avec l'horizontale un angle ayant pour tangente

$$\frac{11,25}{\sqrt{35^2 - 11,25^2}} = \frac{1}{3}$$

à peu près. Partant le parallèle de cette nappe ayant un rayon de 1000 m, se trouverait à 340 m au-dessus du niveau de la mer.

Pour un autre point quelconque placé plus près de la mer, l'élévation serait toujours plus grande. Pour un point à 20 m le même parallèle se trouverait à la hauteur de 680 m.

Pour un point à 11^m25, la nappe se restreindrait au seul axe vertical. Ce qui veut dire que tous les points de la source trop rapprochés de la mer ne donneraient lieu, dans tout l'espace environnant, sauf les exceptions générales indiquées ailleurs, qu'à un seul phénomène, soit une diminution, soit une augmentation de l'effet des rayons directs de la part des rayons réfléchis.

Les chiffres indiqués plus haut devraient être un peu modifiés pour tenir compte de ce que l'angle d'incidence n'étant pas toujours trop proche de 90°, la modification des rayons dans le point d'incidence ne se fait pas toujours strictement de la façon indiquée.

Quoiqu'il en soit les considérations précédentes portent à conclure que la région neutre ne descend pas au-dessous de 300 m, à 1000 m du radiateur, tant que celui-ci n'a aucun point plus haut de 35 m au dessus de la surface de la mer. Partant un récepteur installé à bord d'un navire se trouvera toujours dans la première région douplement ébranlée si le conducteur aérien du transmetteur est vertical; il se trouvera, au contraire, dans la première

région non ébranlée, si le conducteur aérien du transmetteur est horizontal.

Effectivement l'ébranlement n'est jamais redoublé ou annulé, car l'intensité du rayon réfléchi n'égale jamais celle du rayon incident. Dans le cas du conducteur aérien vertical, comme j'ai dit ailleurs, l'énergie réfléchie est une petite partie de l'énergie incidente; l'augmentation de la perturbation près de la mer n'est donc pas alors très forte; mais dans le cas du conducteur aérien horizontal, l'énergie réfléchie est une assez grande partie de l'énergie incidente; alors la diminution de la perturbation près de la mer est bien évidente.

Ces résultats théoriques concordent parfaitement avec ce qui arrive dans la pratique; les considérations précédentes font aussi prévoir qu'on pourrait remarquer des particularités différentes, si une ou les deux stations se trouvaient situées plus haut au dessus de la mer.

Je crois après cela qu'il ne peut rester aucun doute sur le sujet pris en examen.

L'explication que j'ai essayé de donner du phénomène assez curieux de la grande différence d'efficacité, entre le radiateur à conducteur vertical et le radiateur à conducteur horizontal, dans la télégraphie sans fil effectuée entre les côtes et les navires, ne demande autre chose que de voir, dans la surface de la mer, une surface spéculaire séparant un milieu moins réfringent (l'air) d'un milieu plus réfringent (l'eau)

M. Righi, en répétant les expériences de Fresnel sur les ondulations électro-magnétiques produites par des radiateurs à double boule, a trouvé que des phénomènes tout-à-fait analogues à ceux que j'ai décrits plus haut se manifestent dans la réflexion métallique.

A cet égard, on pourrait objecter que la surface de la mer n'est point comparable à un plan poli comme les miroirs ordinaires. Mais je ferai remarquer que, de même, la longueur d'onde des ondulations marconiennes n'est point comparable à la longueur d'onde des radiations lumineuses. De plus, je dirai que la surface de la mer est beaucoup moins irrégulière, vis-à-vis des oscillations de M. Marconi, que la surface de n'importe quel miroir, vis-à-vis des vibrations lumineuses. En effet, le rapport entre la hauteur des vagues les plus impétueuses (supposons 15 m) et la moindre longueur d'onde que je consens à assigner aux oscillations du radiateur Marconi, dans les conditions indiquées ailleurs (90 m), est *cinq fois plus petit* que le rapport entre la saillie de la plus petite irrégularité du plan le mieux poli (admettons un millième de millimètre) et la plus grande longueur d'onde des vibrations lumineuses visibles ($7\frac{1}{2}$ dix millièmes de millimètre).

Peut-être que sur une plaine en terre ferme on trouverait des résultats un peu différents que sur la mer, mais dans la mesure plutôt que dans la substance; parce que la terre, en particulier quand elle est humide, est aussi un conducteur, ou, si l'on veut, un milieu plus réfringent que l'air. En tout cas, les maisons et les autres constructions semblables ne forment pas un obstacle considérable, car les murs sont généralement aussi transparents que l'air aux oscillations électro-magnétiques.

FORME DU RADIATEUR ET DU RÉSONATEUR.

Il résulte de ce qui précède qu'il y a avantage à produire, autant que possible, avec le radiateur, des oscillations polarisées propageant une force magnétique horizontale

Jusqu'à quel point le radiateur de M. Marconi satisfait-il à cette condition ?

Tandis que son conducteur aérien, long, mince, vertical, produit des radiations complètement polarisées de la manière voulue, les quatre boules et les deux tiges, alignées sur une horizontale, produisent des radiations moins polarisées et propageant non pas une force magnétique, mais une force électrique à peu près horizontale.

J'ai dit que les radiations produites par la partie centrale du système sont moins bien polarisées que les autres ; ceci découle du fait que les flux électriques ne suivent pas exactement la ligne des centres dans le système des quatre boules, comme il est pratiquement démontré par les trois étincelles qui éclatent dans les intervalles des boules et qui ont des ramifications irrégulières de directions continuellement variables.

Mais malgré ce défaut de polarité des radiations produites par le système des quatre boules, il serait préférable que ce système fût disposé verticalement plutôt qu'horizontalement.

Cette modification n'est pas même la seule qui puisse sembler avantageuse.

Il faut savoir que M. Marconi commença ses essais, il y a plusieurs années, avec un radiateur Righi, composé de deux boules très rapprochées, chargées par deux boules assez éloignées et un coherer de Lodge qu'il plaçait sur un circuit fermé. Ensuite il eut l'idée de modifier ce coherer, de s'en composer un de son invention et de vérifier que ce coherer était plus facilement sensibilisé en lui ajoutant deux conducteurs latéraux formant un circuit ouvert (embryon de résonateur). Cette dernière tentative lui a peut-être été suggérée par la lecture des recherches de M. Popoff. Ensuite encore, il pensa à ajouter au radiateur des conducteurs semblables aux

précédents (embryon d'excitateur allongé). Finalement il trouva que la meilleure position pour tous les conducteurs était la verticale. Et c'est dans cette disposition qui, au premier abord, peut paraître un détail, mais qui est au contraire de la plus haute importance, que repose la réussite de M. Marconi.

Mais le fait est que par l'addition des deux conducteurs, le conducteur aérien et celui qui va à la terre, à l'excitateur de M. Righi, M. Marconi vint à recomposer à peu près un excitateur de Hertz, à part toutefois la différence des dimensions et quelques détails qui ne sont peut-être pas à l'avantage de l'excitateur télégraphique.

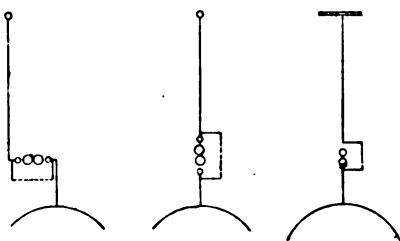


Fig 24 — Modifications de l'excitateur.

En effet, si l'on se reporte au mécanisme aérodynamique par lequel j'ai essayé de représenter l'oscillateur électrique et dans lequel on trouve quatre renflements du tube solide séparés par trois membranes destinées à se déchirer, on voit facilement que les deux interruptions latérales entre les boules pleines et les boules creuses sont bien loin d'être indispensables. Ces interruptions peuvent être supprimées ; et si l'on veut ne pas perdre l'avantage d'obtenir une forte charge avant que la décharge ne se produise, il suffira d'augmenter la longueur de l'interruption unique que l'on doit conserver. Cette modi-

fication sera favorisée par la présence de l'huile de vaseline dans cette interruption, car les propriétés de ce diélectrique permettront de remplacer les larges interruptions latérales par un petit accroissement de l'interruption du milieu ; ce qui diminuera la longueur totale des étincelles et avec cette longueur la résistance ohmique du radiateur. Partant, l'amortissement des oscillations électriques diminuera aussi, et l'efficacité de tout le radiateur en sera augmentée.

Le système des quatre boules serait ainsi réduit à un système de deux boules seulement, ou d'autres solides de rotation, superposés et séparés par une couche de diélectrique liquide.

Le redressement du radiateur, qui dans le modèle de M. Marconi présente deux coudes aux bouts des deux tiges latérales d'où partent les conducteurs additionnels, c'est-à-dire sa disposition dans une seule ligne verticale, permettrait, je pense, de reprendre avec quelque avantage, en considération les projecteurs, nonobstant que Hertz ait trouvé que l'emploi de ces appareils n'est pas très utile quand il s'agit de réfléchir des radiations de longueur d'onde considérable. M. Marconi ne s'est servi de ces appareils que dans ses toutes premières expériences en Angleterre en les adaptant à la partie centrale de son radiateur. Mais, de cette façon, il ne faisait que renforcer un faisceau de radiations destinées à s'éteindre par la réflexion sur la mer. En outre, les dimensions très restreintes qu'il assignait à ses projecteurs ne donnaient pas garantie d'une efficacité suffisante. Il conviendrait peut-être bien de se borner à réunir en un faisceau étroit les seules radiations émises par les ébranlements électriques se produisant au ventre du radiateur ; mais, en adoptant la disposition verticale, on concentrerait des

radiations polarisées de façon à se renforcer par la réflexion ; l'efficacité des projecteurs serait alors assez sensible, et seule la non praticabilité de leur adaptation au transmetteur avec les dimensions voulues pourrait en exclure l'usage.

Je ne cache pas que la disposition des boules centrales le long d'une verticale présente quelques inconvénients. En effet, les bulles de gaz qui se forment dans l'huile de vaseline, quand l'étincelle la décompose, se déplacent alors bien lentement le long de la surface de la boule supérieure et laissent persister un chemin moins résistant et à constante diélectrique plus petite, chemin préféré par l'étincelle, qui éclate alors avec une énergie beaucoup moindre, ce qui nuit à la correspondance.

J'ai dit en passant que le but de l'emploi de l'huile de vaseline est de rendre plus puissantes les décharges de l'excitateur et de conserver en bon état, c'est-à-dire propres et inoxydées, les deux surfaces métalliques entre lesquelles éclatent les étincelles plus actives.

Mais je pense qu'il diminue parfois l'uniformité des décharges. En effet, dans le radiateur à quatre boules de M. Marconi, tandis que les deux décharges latérales qui traversent les deux couches d'air comprises entre les boules pleines plus grosses et les boules creuses plus petites, ne présentaient pas de variations d'intensité très visibles, la décharge centrale qui réchauffe et décompose l'huile de vaseline en gaz qui remonte et en charbon qui se répand, paraissait très différente d'un instant à l'autre.

Par moments, l'étincelle du milieu avait de telles grandeur et intensité lumineuse qu'on pouvait très bien la distinguer en regardant de côté, au travers d'une grosse épaisseur d'huile et du parchemin qui la contenait ; par moments

elle était si faible qu'on ne l'apercevait pas même en regardant du haut, à travers une petite épaisseur d'huile; par moments elle disparaissait tout-à-fait.

Ceci doit s'attribuer, en partie, à la présence des bulles de gaz qui, se détachant lentement des surfaces métalliques où elles se forment, permettent à l'étincelle de se frayer, à travers elles, un chemin moins résistant, quoique plus long; en partie, à la présence du charbon libre très divisé, pouvant constituer, dans le sein de l'huile même, des dérivations de résistance réduite.

Ces causes de diminution de la constante diélectrique et de la résistance spécifique du milieu ont pour effet de diminuer la différence de potentiel entre les deux moitiés du radiateur pour laquelle la décharge peut s'accomplir, et partant de diminuer l'énergie transmise au milieu.

Effectivement, les résultats pratiques de certains essais me conduisent à croire que l'efficacité du radiateur est diminuée par les irrégularités dont je viens de parler.

Cette diminution d'efficacité est à coup sûr plus sensible quand les bulles de gaz restent plus longtemps adhérentes aux boules en regard des deux moitiés du radiateur, c'est-à-dire quand ces boules sont sur une ligne verticale plutôt que sur une ligne horizontale. Mais il y aurait moyen de satisfaire aux différentes exigences en disposant les centres des boules sur une ligne inclinée ou horizontale, tout en assignant une direction verticale aux tiges destinées à relier ces boules avec les conducteurs additionnels.

On pourrait encore arranger les choses de façon qu'un très petit déplacement des bulles, qui tendent à monter, les oblige ou à trop s'allonger ou à se détacher vite de la surface des boules; on y parvient en augmentant la courbure de cette surface, c'est à dire en diminuant le diamètre des boules.

Il ne faut pas pourtant perdre de vue qu'une diminution de diamètre des boules augmenterait la distance explosive de l'étincelle intermédiaire à égalité de différence de potentiel, et qu'une augmentation de longueur de l'étincelle produirait une augmentation dans sa résistance ohmique et partant accélérerait l'amortissement des oscillations électriques dans le radiateur. Il faudrait donc se contenter d'une différence de potentiel moindre ou d'une série d'oscillations plus courte. Cette remarque porterait à conclure qu'il y a peut-être en pratique une limite inférieure pour le diamètre des boules. Mais des raisonnements du genre de celui que je viens de faire sont toujours très incertains.

Un autre moyen, peut-être plus efficace pour éviter l'inconvénient produit par les bulles des gaz naissants, mais qui entraînerait une petite complication dans les appareils, serait de disposer, dans le récipient contenant l'huile de vaseline, un agitateur à palettes qui déplacerait continuellement le liquide entre les deux boules.

Toutefois, la question de la diminution du diamètre des boules se présente encore dans d'autres considérations, et, contrairement à l'avis qu'émettait autrefois M. Marconi, je pense qu'au moins jusqu'à une certaine limite, cette diminution est favorable à la correspondance.

Il est facile de voir qu'à égalité de période, l'efficacité d'un élément du radiateur est proportionnelle au produit de sa longueur par l'amplitude du courant alternatif qui le parcourt.

En prenant pour abscisses (verticales) les longueurs sur l'axe du radiateur et pour ordonnées (horizontales) les amplitudes locales (fig. 25), on peut tracer un diagramme de la distribution du courant entre le ventre et les deux nœuds des oscillations. On voit alors sans effort qu'à

égalité de période, l'efficacité du radiateur tout entier est proportionnelle à l'aire comprise entre l'axe et la courbe du courant.

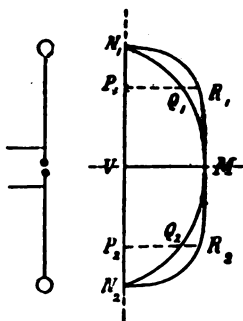


Fig. 25. — Efficacité d'un radiateur.

Comme c'est la distribution de la capacité électro-statique le long du radiateur qui détermine la diminution de l'intensité du courant en allant du ventre vers le nœud des oscillations, on voit qu'il peut y avoir avantage à diminuer la capacité distribuée vers le centre du système en l'augmentant autant qu'il faut vers les deux extrémités.

C'est pour cela que je suis d'avis de faire éclater l'étincelle entre des boules de petit diamètre, et d'ajouter des plaques métalliques de large surface aux bouts du conducteur aérien et du conducteur inférieur, s'il n'est pas relié à la terre.

Il conviendrait peut-être d'employer, à l'extrémité supérieure, une large plaque horizontale qui pût encore servir à réfléchir vers le bas quelque peu des radiations obliques émanées par les parties les plus proches du conducteur vertical.

Il est évident qu'une fois un radiateur vertical adopté, le résonateur doit aussi être placé verticalement, car il

doit avoir, en chaque point, la direction de la force électro-motrice d'induction qui, elle-même, a la direction du courant inducteur.

Quant à la distribution de la capacité sur sa longueur, je pense qu'il convient de suivre la même règle que pour le radiateur. Si la capacité distribuée vers le centre du résonateur est petite, l'intensité du courant induit ne diminue pas beaucoup en s'éloignant du ventre des oscillations. Il n'est pas alors strictement nécessaire de rechercher ce point particulier (chose qui n'est pas facile) pour y placer le coherer, dans lequel il convient évidemment d'avoir les oscillations électriques les plus intenses.

A propos de la partie centrale du radiateur, M. Marconi écrit que, dans la série d'expériences faites à Dower, « on a constaté qu'il n'y a aucun avantage à se servir du » radiateur de M. Righi, parce qu'on peut obtenir les » mêmes effets en se servant de deux boules simples (de » 2 cm environ) séparées par une couche d'air, comme » diélectrique, après avoir déterminé expérimentalement » la distance explosive la plus avantageuse.

» Il est aussi intéressant de savoir que lorsqu'on emploie » des conducteurs verticaux assez longs, il n'est pas » nécessaire de frotter et de nettoyer la surface des boules » à la place où se forment les étincelles. » (?)

Les expériences de Salisbury et de Dower ont été suivies par des expériences entre l'île de Wight et la côte anglaise.

« L'excitateur employé dans ces expériences se com- » pose de cinq boules de 5 cm de diamètre, platinées » autour du point où les étincelles doivent éclater et écar- » tées les unes des autres à des distances réglables. Cet » excitateur ne comprenant pas d'huile de vaseline, est

» plus léger et plus facilement transportable ; c'est
» pourquoi il sert mieux que celui de M. Righi, dont on
» se servait précédemment. »

Après ce que j'ai exposé plus haut, il est inutile que je dise qu'à mon avis, tandis que la diminution du diamètre des boules indique un progrès du système télégraphique, la substitution de l'air à l'huile de vaseline est, au contraire, un pas en arrière dans son perfectionnement.

Mais il faut reconnaître que, si l'on ne veut absolument pas se servir d'un diélectrique au pouvoir inducteur spécifique plus grand que celui de l'air, il y a réellement avantage à subdiviser l'étincelle en plusieurs parties. En effet, puisque la distance explosive de l'étincelle, dans un diélectrique donné, croît plus vite que la différence de potentiel qui la produit, il s'ensuit que si l'on veut que la décharge ne se produise que pour une certaine différence de potentiel V , il suffira de ménager, entre deux conducteurs extrêmes, quatre interruptions de 1 mm, par exemple, en interposant trois conducteurs intermédiaires, tandis qu'il en faudrait une seule de 6 mm, supposons, en éloignant tout conducteur intermédiaire; et l'on voit facilement que, dans la première disposition, la résistance du radiateur est diminuée et l'amortissement de ses oscillations est rendu moins rapide, précisément comme il convient.

LONGUEUR DES CONDUCTEURS AÉRIENS.

Plusieurs des considérations déjà faites à propos du conducteur aérien de l'excitateur, font prévoir l'importance que doit avoir sa longueur dans la transmission des signaux à de grandes distances.

En augmentant la longueur du conducteur, la capacité,

la self-induction, la période des oscillations, leur amplitude maxima sont aussi accrues selon des lois particulières. Si, pendant l'allongement du conducteur aérien, on maintient toujours les mêmes dispositions à la partie centrale du radiateur, il y a encore un autre élément qui s'accroît : c'est le rapport entre la somme des radiations polarisées de la façon la plus convenable pour la correspondance, et la somme totale des radiations émises par l'excitateur.

Pourtant, comme chaque élément de l'appareil produit une excitation proportionnelle à l'amplitude locale du courant oscillant, amplitude qui décroît en procédant du ventre vers les nœuds, et comme on ne saurait établir la distribution de cette amplitude le long du radiateur, on ne saurait indiquer une relation simple entre l'efficacité et la longueur du conducteur aérien à égalité d'énergie fournie par le circuit d'alimentation.

Le rendement de la transformation de cette énergie dépend de circonstances trop nombreuses pour qu'on puisse prétendre l'évaluer, même avec une approximation assez large.

Le conducteur aérien ajouté au coherer et qui fait partie du résonateur, a peut-être aussi une efficacité dépendant de sa longueur. Si l'on suppose le conducteur d'émission et le conducteur de réception rectilignes et verticaux, et si la distance qui les sépare est bien plus grande que leur longueur, on peut dire que tous les éléments du résonateur, se trouvant à peu près dans les mêmes conditions, sont le siège d'une même force électro-motrice d'induction élémentaire. La force électro-motrice totale est donc assez approximativement proportionnelle à la longueur du conducteur aérien du résonateur. Sa résistance ohmique est aussi proportionnelle à sa longueur ; sa capa-

cité et sa self-induction croissent toutes les deux un peu moins vite que sa longueur ; on ne saurait donc rien dire d'exact à propos de l'intensité du flux électrique à l'emplacement du coherer, élément qui influe beaucoup sur la sensibilité du récepteur.

Comme je l'ai déjà indiqué en passant, il est facile de voir qu'il conviendrait de connaître dans quel point du résonateur vient à se former le ventre des oscillations induites, pour y placer le coherer. Il suffirait alors d'une bien petite force électro-motrice d'induction totale pour le sensibiliser et pour établir la correspondance.

On serait aussi porté à croire que l'emplacement des boules du radiateur sur le circuit d'émission n'est pas indifférent. Peut-être faudrait-il placer l'interruption où doit éclater l'étincelle centrale, de manière qu'elle devienne le siège du ventre des oscillations, quand celles-ci y sont engendrées par induction. Mais de semblables problèmes sont trop délicats pour oser les résoudre par intuition plutôt que par des expériences bien appropriées.

Je remarquerai en passant qu'il ne faut pas trop se fier non plus aux déductions que l'on pourrait faire en considérant le coefficient d'induction mutuelle entre les deux circuits du radiateur et du résonateur, calculé par la formule ordinaire de Neumann : car cette formule n'est valable que pour des circuits filiformes parfaitement fermés.

A propos de la longueur des conducteurs aériens et de la distance de transmission, M. Marconi a cru pouvoir autrefois exprimer la règle que la distance était proportionnelle au carré de la longueur, les deux conducteurs aériens ayant les mêmes dimensions. J'ai indiqué plusieurs circonstances, indépendantes de la longueur des conducteurs, qui ont aussi une influence sensible sur

•

la distance de transmission. Je ne me sens donc pas enclin à accepter une règle si simple. Je crois même que l'accroissement de la distance de transmission est moins rapide que l'accroissement du produit des longueurs des deux conducteurs d'émission et de réception.

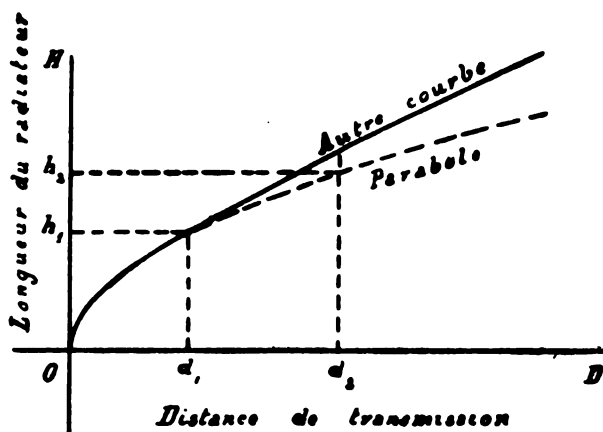


Fig. 26.

Voici quelques détails d'expériences plus récentes qui m'ont été communiqués par M. Marconi :

« Dans les essais faits à Salisbury, on a constaté qu'en » augmentant la longueur du fil aérien vertical dont on » soutenait l'extrémité supérieure au moyen de ballons ou » de cerfs-volants, la distance à laquelle il est possible de » correspondre augmente plus rapidement qu'en propor- » tion simple de la longueur des deux fils verticaux. On » n'a pas pu pourtant bien constater si la distance utile » augmente avec le carré de la longueur des conducteurs » verticaux.

» En employant les cerfs-volants construits par le capi- » taine Baden Powell et en se servant d'un fil de cuivre

» de 2 mm de diamètre, recouvert de caoutchouc, long de
» 70 m, qui servait en même temps comme conducteur
» aérien et comme câble de retenue, on a pu toujours
» (excepté quelquefois lorsque le vent est venu à manquer)
» correspondre à une distance de 16 km à travers des cam-
» pagnes couvertes de petites collines.

» Un autre essai avec une plus grande hauteur de fil
» vertical (à peu près 200 m) donna des résultats satis-
» faisants à une distance de 54 km (de Salisbury à
» Bath). »

Dans les expériences de Dower :

« En premier lieu on a pu confirmer la loi observée (par
» M. Marconi) en Italie, dans le mois de novembre 1895 ;
» c'est-à-dire que la distance à laquelle on peut recevoir
» les signaux télégraphiques varie avec le carré de la lon-
» gueur des fils ou conducteurs verticaux employés au
» transmetteur et au récepteur, quand la longueur de ces
» conducteurs est égale.

» Cette loi a été vérifiée pour des longueurs de fil de
» 10 à 30 m. On n'a pas fait, dans ce cas, d'expérience
» avec des fils plus longs »

Voici encore les résultats d'une troisième série d'expé-
riences :

« A Alum-Bay (île de Wight), près de la pointe The
» Needles, on a érigé un mât haut de 40 m, et à Bourne-
» mouth (West), sur la côte anglaise, on a érigé un autre
» mât long de 30 m. En employant mes appareils (de
» M. Marconi) modifiés en partie, on a pu jusqu'à présent
» maintenir une correspondance régulière entre les deux
» positions, dans des conditions atmosphériques assez
» différentes. »

En outre :

« Un grand nombre d'expériences importantes ont

» été faites entre la station de Alum-Bay et des bateaux
» manœuvrant au large.

» Avec un mât long de 16 m sur le bateau, on a toujours
» pu correspondre à 20 km, quand il n'y avait pas
» d'obstacles naturels, comme des îles élevées, entre les
» deux appareils

» On a pu aussi obtenir des communications à 8 km,
» entre des positions séparées par un mamelon ayant une
» largeur de 4 km à la base et une hauteur dépassant d'à
» peu près 40 m la hauteur du mât le plus long »

Il est à remarquer que :

« Dans toutes ces expériences on a toujours fait usage
» de bobines d'induction qui pouvaient donner une étin-
» celle régulière d'une longueur de 20 cm »

On voit facilement que toutes ces expériences ne donnent pas des résultats très concordants et qu'elles tendraient plutôt à confirmer l'opinion que j'ai exprimée plus haut quant au rapport entre la distance de transmission et la hauteur des conducteurs aériens.

Voici maintenant quelques notes sur d'autres essais très intéressants :

« Dans d'autres expériences faites aussi à Salisbury,
» on a constaté qu'il y a avantage, relativement à la dis-
» tance de correspondance qu'on peut obtenir, si, au lieu
» d'employer un seul fil vertical pour la transmission, on
» se sert de plusieurs fils parallèles entre eux, maintenus
» à une distance d'environ 30 m l'un de l'autre, et tous en
» communication, à l'extrémité inférieure, avec le même
» pôle du radiateur. La même augmentation dans la
» distance de correspondance peut être obtenue en se
» servant d'un large réseau ou toile métallique, à la place
» des conducteurs parallèles.

» Au récepteur, on a vérifié un effet pour ainsi dire
» opposé ; c'est-à-dire une plus grande distance en se
» servant d'un fil vertical mince, et aucun avantage en
» employant des fils multiples ou des toiles métalliques.»

» Dans les expériences de Dower: « On a aussi vérifié
» qu'en adaptant à l'extrémité supérieure des deux fils
» verticaux (ou presque verticaux) de grandes plaques
» ou capacités, la longueur de fil nécessaire pour une
» distance donnée peut être considérablement réduite ;
» dans quelques cas, en se servant de cylindres longs de
» 1 m et d'un diamètre de 50 cm, on peut la réduire à un
» tiers de la longueur qui est nécessaire en absence des
» capacités, quand toutefois les deux capacités sont
» égales. »

Dans les essais de Alum Bay :

.. .. « On a aussi trouvé que quand la longueur des
» deux fils est différente, on peut améliorer de beaucoup
» les effets et les porter presque à la même valeur que
» quand la longueur des deux fils est égale, en introdui-
» sant dans le fil le plus court une bobine ou solénoïde de
» fil gros bien isolé, ayant une certaine capacité et une
» certaine self-induction.

» Le nombre des spires et la longueur du fil de cette
» bobine sont déterminés par tâtonnements »

Tandis que ces deux derniers essais feraient croire que l'accord entre le rythme du circuit d'émission et celui du circuit de réception a une certaine importance, l'essai qui précède ces deux derniers paraît contraire à la nécessité d'une pareille précaution. En effet, si l'accord entre l'excitateur et le récepteur présentait un grand avantage, après avoir subdivisé le conducteur aérien du premier appareil, il conviendrait de subdiviser pareillement le

conducteur aérien du second appareil, ou bien d'adopter quelque autre disposition équivalente au point de vue de l'altération introduite dans la capacité et dans la self-induction du premier appareil.

En dehors de cette considération, on peut se demander comment la subdivision du conducteur aérien peut accroître l'*efficacité* de l'excitateur et pourquoi la même disposition ne peut pas accroître la *sensibilité* du récepteur.

Il est plus facile de trouver une réponse à la première question qu'à la seconde.

En effet, il n'est pas difficile de se rendre compte que la subdivision du conducteur aérien en plusieurs fils divergents accroît la capacité et diminue la self-induction du système oscillant auquel il appartient ; or, avec une pareille disposition et en provoquant une différence de potentiel assignée entre les deux parties du radiateur, on parvient à mettre en mouvement une plus grande quantité d'électricité, sans pourtant diminuer trop la fréquence des oscillations, dont la période dépend de la même manière des deux éléments qui varient en sens inverse

$$(T = 2\pi \sqrt{LC}).$$

Dans le cas où l'on ajoute tout simplement une capacité au conducteur d'émission, on a un accroissement du courant sans réduction de la période, ce qui, dans des circonstances spéciales, pourrait déjà suffire à améliorer la correspondance.

CIRCUIT DE RÉSONANCE.

La sensibilité du récepteur ne dépend pas seulement de la longueur du fil aérien annexé au coherer, c'est-à-dire du développement de son circuit de résonance ; mais il

dépend aussi de la sensibilité du coherer, de l'emplacement de celui-ci et de l'accord entre le rythme propre du résonateur et celui de l'excitateur.

Quant à l'emplacement du coherer, j'ai déjà indiqué qu'il conviendrait que ce tube sensible fut placé au ventre des oscillations induites dans le circuit de résonance, point qui n'est pas pas facile à déterminer, à moins d'une symétrie de ce circuit que la nécessité pratique de tenir le conducteur inférieur plus court que le conducteur aérien empêche d'obtenir, sans parler encore de la distribution différente de la capacité électro-statique qu'entraîne la liaison du conducteur inférieur même avec la terre. On pare à ce défaut en diminuant autant qu'on peut la capacité distribuée vers le milieu du circuit de résonance.

Quant à la sensibilité du coherer, elle dépend d'une foule de circonstances dont on ne connaît pas exactement les effets. La meilleure constitution du tube sensible est une question à l'étude de laquelle s'acharnent heureusement déjà de nombreux physiciens et que je n'ai pas le loisir d'examiner longuement ici.

J'ai nié ailleurs que certaines dispositions minutieuses adoptées par M. Marconi dans la construction des coherers fussent indispensables. Les communications faites par M. Branly à l'Académie des sciences, en décembre de l'année dernière, parlent dans le même sens. J'ai obtenu moi-même des coherers passables sans produire aucun vide dans le tube de verre et sans envoyer de vapeur de mercure sur les limailles de nickel et d'argent, limailles que je n'ai pas essayé de remplacer par d'autres. En employant des limailles un peu fines, j'ai reconnu la nécessité de n'exercer aucune pression sur elles; il convient même de ne pas remplir avec ces limailles toute la section du tube de verre quand on y fixe de petits cylindres

d'argent soudés à deux fils de platine. Toutefois, l'épaisseur de la couche de limaille doit toujours être minime, et même inférieure au demi-millimètre. J'ai construit d'autres coherers en substituant aux petits cylindres en argent de petits boudins formés avec les extrémités des fils de platine fixés au tube de verre. Ce tube était un peu courbé près de la petite interruption ménagée entre les deux boudins, dans le but d'obliger la limaille, simplement abandonnée dans le tube, à se réunir en ce point, quand le tube est disposé à peu près horizontalement avec le coude en bas.

Malheureusement le courant local que l'on peut admettre dans ces décéleurs des oscillations électro-magnétiques est absolument minime, et je ne vois pas avec quel artifice on pourrait bien réussir à supprimer dans le récepteur le circuit de secours, dont la présence est rendue nécessaire par la limitation que je viens d'indiquer, et qui est toujours une complication de l'appareil télégraphique.

Peut-être parviendra-t-on à ce but par l'emploi de coherers à limaille noyée dans des diélectriques solides, comme on en a déjà construit, si l'on réussit à en obtenir de sensibilité suffisante.

Quant à l'accord entre le radiateur et le résonateur, j'ai dit ailleurs que je ne reconnais pas qu'il soit strictement nécessaire pour que le second appareil soit simplement impressionné par le premier.

A l'appui de cette thèse, je dirai que pendant les expériences à la Spezia, on se servit à la station de transmission d'un appareil de contrôle, c'est à dire d'un récepteur destiné à enregistrer exactement les signaux émanant du transmetteur voisin, afin de les comparer ensuite avec les signaux enregistrés par le récepteur

mobile, et que jamais cet appareil de contrôle ne fut même grossièrement accordé avec aucun des deux autres appareils.

Ce récepteur auxiliaire était pourvu d'un côté d'un conducteur filiforme vertical de 1 m environ, et de l'autre d'une bandelette de cuivre, presque horizontale, de 40 cm environ, non reliée à la terre.

Le récepteur principal était muni d'un conducteur aérien, d'une longueur qui varia de 16 à 28 mètres, portant une plaque de zinc d'à peu près $\frac{1}{3}$ de mètre carré, et qui se trouva parfois étendu le long d'un mât métallique, dont le voisinage devait en augmenter considérablement la capacité; son conducteur inférieur était toujours plongé dans la mer.

Le transmetteur, dont les quatre boules à la place du coherer réalisaient déjà des conditions de capacité et de self-induction différentes de celles des deux récepteurs, était pourvu d'un conducteur aérien, toujours éloigné de toute masse métallique, dont la longueur varia de 30 à 34 mètres, et portant une plaque de zinc pareille à celle du récepteur; son conducteur inférieur était toujours relié à la terre.

Malgré ces différences frappantes dans les conditions, les deux récepteurs répondirent toujours assez bien au transmetteur et les signaux enregistrés par les deux récepteurs concordèrent suffisamment.

Je veux encore noter que l'essai du récepteur, qu'il faut faire chaque fois qu'on lui adapte un coherer et chaque fois qu'il semble nécessaire de régler la sensibilité du relais, se fait en l'excitant, non pas avec les oscillations d'un radiateur quelconque, mais avec les perturbations produites par les extra-courants qui s'engendrent dans un circuit contenant une pile et une sonnerie ordinaire. On

comprend aisément que le rythme de ces perturbations est d'un ordre bien différent de celui des flux oscillant dans un excitateur.

Une autre circonstance qui pourrait venir à l'appui de la thèse que beaucoup d'autres conditions sont *plus importantes* que l'accord entre le radiateur et le résonateur, est, comme j'ai déjà dit, celle qui montre qu'il convient de subdiviser en plusieurs fils le conducteur aérien du transmetteur, tandis qu'il convient de réunir en un seul fil le conducteur aérien du récepteur.

Je suis donc d'avis que l'accord entre l'appareil de transmission et celui de réception n'est nécessaire que pour augmenter quelque peu la distance de correspondance quand on se rapproche de la limite de cette distance, et même dans cette intention, on ne saurait produire cet accord que d'une façon assez grossière, tandis que le manque de cet accord n'exclut pas qu'un récepteur puisse percevoir les signaux émis par un transmetteur dans un rayon qui n'est pas beaucoup plus petit que la distance maximum de correspondance, relative à la puissance de l'excitateur et à la sensibilité du coherer et du relais, dont on fait usage. Cette circonstance, comme on le comprend, a une très grande importance pratique.

CIRCUITS DE SECOURS ET D'ENREGISTREMENT.

Il convient de remarquer une circonstance importante : La machine Morse, qui fait partie de l'appareil récepteur, actionnée par un circuit local qui est simplement fermé ou bien laissé ouvert par le relais, ne peut fournir aucune indication sur l'intensité des perturbations électro-magnétiques dans l'espace où elle se trouve. Le relais même n'a pas cette faculté : lui aussi fonctionne par l'effet d'une pile locale sur un circuit de résistance ohmique

plus ou moins grande, selon l'état de la poudre métallique placée dans le tube sensible. Pour toutes les résistances en-dessous d'une limite supérieure assez élevée, le relais fonctionne à peu près également bien ; et encore, la résistance dans le coherer de M. Marconi ne paraît pas varier par degré ou avec une lente continuité : elle descend très rapidement de la valeur de quelques milliers d'ohms, dans son état ordinaire, à la valeur de peu de centaines d'ohms, sous l'influence de très-petites perturbations électro-magnétiques, et ne paraît pas diminuer davantage quand on augmente l'intensité de ces perturbations ; on peut donc dire que le courant, toujours très-faible, qui traverse le relais s'établit à un certain régime, ou bien descend en-dessous de l'intensité limite suffisante à son fonctionnement, analogiquement à ce qui arrive pour le courant de la machine.

Partant, le récepteur tout entier reproduit les signaux transmis ou bien se tait tout-à-fait ; il peut parfois ne pas enregistrer quelques-uns des signaux transmis à cause d'une insuffisance momentanée dans l'énergie rayonnée par le transmetteur, mais les signaux enregistrés présentent toujours la même netteté.

Le circuit de secours et le circuit d'enregistrement contiennent un relais, une machine télégraphique et un interrupteur automatique dont les électro-aimants donnent lieu à des effets nuisibles sur le coherer. Mais il est facile de diminuer l'importance des extra-courants qui produisent ces effets en disposant des petits voltamètres à eau en dérivation par rapport aux spirales magnétisantes de ces électro-aimants.

J'ai construit quelques voltamètres à résistance et à capacité de polarisation réglables à volonté, au moyen de tubes de verre fermés aux deux bouts par deux bouchons en caoutchouc traversés par des fils de platine dont les

extrémités formaient des petits boudins. On pouvait en diminuer la résistance ohmique et en augmenter la capacité en rapprochant ces deux électrodes en platine. Avec ces voltamètres, on réussit à empêcher parfaitement toute réaction des courants locaux sur le coherer dont on se sert.

Il convient que les armatures du relais placé dans le circuit de secours et de l'interrupteur placé dans le circuit d'enregistrement acquièrent naturellement des vibrations de période peu différentes. Il convient encore que cette période soit la plus courte possible.

Il n'est pas facile d'enlever tout-à-fait à l'armature de la machine télégraphique la faculté de suivre les vibrations de l'armature du relais, quand on veut se servir d'une machine ordinaire. D'ailleurs, la chose n'est pas indispensable si l'on parvient à obtenir des pointillés suffisamment menus à la place de traits absolument continus.

J'ai trouvé convenable de placer en dérivation, plutôt qu'en série, les électro-aimants de la machine et de l'interrupteur dans le circuit d'enregistrement. Dans ces conditions, cinq éléments Leclanché m'ont suffi au lieu des douze employés par M. Marconi. Il est vrai que je n'ai pas fait usage d'éléments secs comme lui.

Si l'on voulait vraiment se contenter de pointillés assez menus au lieu de traits continus, on pourrait effectuer une simplification dans le récepteur : on pourrait réunir en un seul appareil l'électro-aimant de la machine et celui de l'interrupteur automatique, en adaptant le frappeur de cet instrument à l'armature de l'autre. L'attache pourrait être élastique. Cette disposition permettrait de diminuer encore le nombre des éléments de pile et le nombre des résistances non inductives.

La réduction des pointillés en traits continus sur le papier télégraphique peut s'opérer par des modifications géométriques des organes de la machine.

TRANSPARENCE, OPACITÉ ET DIFFRACTION.

J'ai dit qu'en général les diélectriques sont transparents aux ondes électro-magnétiques et que les conducteurs sont opaques à ces radiations. Partant, la présence de murs en pierres ou en briques ne sera pas un obstacle à la correspondance faite au moyen de ces ondes, pour nombreux et gros qu'ils soient, à moins que leur surface ne soit mouillée. La correspondance sera dérangée, au contraire, par les canalisations destinées aux services de l'eau domestique ou pluviale, du gaz, de l'électricité, qui se trouveront dans ces murs et d'autant plus que les embranchements parallèles aux conducteurs aériens du transmetteur et du récepteur, c'est-à-dire verticaux, seront plus nombreux et plus rapprochés, car alors ces canalisations métalliques constitueront dans leur ensemble un treillis apte à fonctionner comme écran. Les masses de terre d'épaisseur suffisante pour compenser le peu de conductibilité qui leur est conférée par l'humidité intérieure, doivent être aussi considérées comme des écrans partiels.

Pendant les expériences à la Spezia, M. Marconi rapporta une fois avoir fait, entre autres, l'épreuve suivante : Il avait placé son récepteur sous terre, ne laissant à découvert qu'un tronçon assez court du conducteur ajouté au coherer et il avait trouvé que cet appareil était parfaitement sensibilisé par le transmetteur. Ceci ne doit pas étonner, parce que, en admettant même que la partie libre du conducteur fut le seul siège de la force électromotrice induite, on comprend bien que le courant oscil-

lant induit ne peut pas se borner à cette partie. Il traverse donc le coherer, placé n'importe où, avec une intensité d'amplitude différente, selon sa position. Cette intensité ne serait continuellement nulle, que si le coherer était placé en un nœud des oscillations.

Il rapporta encore avoir renfermé son récepteur dans une caisse de cuivre d'une épaisseur de 1 1/2 mm sans rien laisser sortir du circuit de réception, et avoir trouvé que la machine avait enregistré des signaux. Cette circonstance m'étonna fort. Elle s'explique seulement, en rappelant l'effet perturbateur d'une fente étroite dans une enveloppe conductrice fermée et en supposant que le couvercle ne bouchait pas parfaitement l'ouverture de la caisse employée.

Au cours des expériences même que l'on fit à la Spezia, à bord d'un cuirassé, on descendit le récepteur sous le pont blindé, dans un local presque entièrement entouré de grandes masses métalliques. On le descendit même dans la cale, à 2^m50 sous la surface de la mer. On ne remarqua aucune différence sensible dans la réception. Mais comme on se servit toujours d'un conducteur aérien extérieur bien isolé, dont le bout supérieur restait constamment à la même hauteur, ce résultat n'a rien qui puisse étonner. Indépendamment de la distinction faite plus haut, à propos du siège de la force électro-motrice induite et du siège du courant induit, on comprend encore parfaitement qu'un local quelconque d'un navire n'est pas absolument fermé ; cette expérience donc, loin de confirmer la précédente, ne vaut pas même celle du récepteur placé sous terre.

M. Marconi déclare encore avoir vérifié pendant les premières expériences anglaises que le circuit de résonance était impressionné par les radiations sortant de

l'excitateur, même s'il y avait un obstacle naturel pas trop élevé entre les deux appareils. Nonobstant les doutes de M. Marconi à ce sujet, je contestai que les radiations traversent, dans ce cas, l'obstacle intermédiaire qui, à mon avis, ne pouvait manquer de quelque conductibilité, et partant de la faculté de transformer en chaleur, due au courants induits, l'énergie électro-magnétique rayonnée, j'acceptai, au contraire, l'hypothèse que ces radiations contournent l'obstacle par un effet de diffraction semblable à celui qui permet de reconnaître dans une chambre entièrement parée de noir, la présence d'une source lumineuse au-delà d'un écran parfaitement mat par des lueurs colorées qui se présentent tout autour des bords de cet écran.

Il n'est pas juste de dire, dans ce cas, que les rayons se fléchissent en effleurant le contour du corps opaque ; mais cette hypothèse (qui disparut après l'explication que Fresnel donna des phénomènes de diffraction au moyen de la théorie ondulatoire de la lumière), offre une locution simple et efficace, dont je me servirai encore.

A ce sujet, je me permettrai de dire que j'ai de forts doutes sur la réalité de la courbure que M. Preece assigne aux rayons électro-magnétiques dans sa conférence à la Royal Institution, que l'on a malheureusement par trop copiée !

Dans les expériences à la Spezia, cet effet de passage par dessus et latéralement aux obstacles naturels par diffraction n' put être établi. Quand les parties les plus saillantes des conducteurs aériens du transmetteur et du récepteur n'étaient pas à même de se voir, pour ainsi dire, il n'y avait pas de correspondance. Ainsi, ces deux conducteurs ayant une hauteur de 35 m environ, une hauteur de 100 m environ placée à peu près vers la moitié

d'une distance de 9 km entre le radiateur et le résonateur empêcha toute correspondance.

M. Marconi m'a écrit pourtant que d'autres expériences plus récentes, près de Salisbury, ont confirmé le résultat des premières expériences anglaises, ce qui peut très-bien être arrivé, si les conditions locales exigeaient une courbure des rayons un peu moindre qu'à la Spezia.

EFFET DE L'ÉTAT ATMOSPHÉRIQUE.

Une circonstance remarquable se présenta à la Spezia dans le mois de juillet. Un jour, l'atmosphère promettait un orage. Des nuages légers, mais bas, s'étendaient sur la mer. Le transmetteur était placé à terre, le récepteur était installé sur un remorqueur. La transmission des signaux s'accomplissait assez régulièrement, quand il arriva que de nombreux signaux très courts furent enregistrés sur le papier télégraphique. Ces signaux ne pouvant être aucunement attribués ni à la transmission, ni à aucun mouvement désordonné du remorqueur (dont l'hélice ne donnait pas de coups suffisamment rapides pour conférer à l'ancre du relais ou de la machine aucune vibration indépendante de la transmission) on dut les attribuer à des décharges atmosphériques. On pensa alors que des décharges atmosphériques obscures se frayaient un passage à travers le conducteur aérien et au coherer pour se rendre à la mer où plongeait le conducteur inférieur du récepteur. Mais il se peut aussi que les signaux fussent dus à des effets d'induction de la part de décharges orageuses lointaines dont on voyait parfois les lucurs au nord du golfe. Le coherer devait certainement être sensibilisé par ces flux instantanés (et peut-être oscillatoires) comme par tout autre flux variable. Les deux origines indiquées de l'étrange phénomène sont relativement confirmées par

la durée très courte des impressions perçues par le récepteur. A cause de la très courte durée de ces signaux *intrus*, les signaux télégraphiques, assez longs, ne furent pas bien moins déchiffrables que dans les circonstances ordinaires.

M. Marconi affirma que jamais un fait semblable ne s'était présenté en Angleterre entre Penarth et Brean-Down, près de Weston-super-Mare, à travers le canal de Bristol, ni ailleurs, quoique les conditions atmosphériques eussent été plusieurs fois plus menaçantes que celles qui y donnaient lieu à la Spezia, et même pendant la pluie et de puissants orages. Mais, jusqu'à un certain point, ce contraste d'événements peut être expliqué par la plus grande humidité de l'atmosphère près des côtes anglaises que près des côtes italiennes.

Que l'on remarque, à ce sujet, que c'est à l'état plus hygrométrique de l'atmosphère que l'on attribue la rareté des coups de foudre en hiver là même où en été ils sont très fréquents

Il se peut que l'on réussirait au moins à diminuer le nombre des signaux intrus perçus par le récepteur en temps d'orage en ôtant la communication de son conducteur inférieur avec la mer ou la terre, ce qui, d'autre part, ne paraît pas changer sensiblement les conditions de la réception.

Récemment, M. Marconi m'a fait savoir qu'au cours de ses expériences près de l'île de Wight « on a vérifié » (quand l'isolement est maintenu dans de bonnes conditions) que la distance à laquelle on peut communiquer est plus grande en temps nuageux ou de pluie que quand le ciel est serein. »

Cette affirmation mériterait confirmation ou au moins une explication qui devrait ressortir d'expériences bien appropriées.

Il se peut que les *nuages* améliorent les conditions de transmission en réfléchissant vers le bas une partie des radiations rayonnées vers le haut. Il se peut que la *pluie* augmente les facultés du transmetteur en accroissant la capacité des conducteurs aériens qui, mouillés, auraient une enveloppe conductrice en dehors de l'isolant qui en augmenterait le diamètre. Mais je ne crois pas que la pluie tombant entre les deux appareils soit favorable à la transmission ; je crois même le contraire à cause de la plus grande déperdition de l'énergie électro-magnétique sous forme de courants induits dans les gouttes. L'avenir nous éclairera peut-être à ce sujet.

PHÉNOMÈNE PARTICULIER.

Pendant les expériences à la Spezia, un phénomène se présenta que je ne veux pas passer sous silence. Un jour, le récepteur installé sur un remorqueur perçut les signaux transmis jusqu'à une distance de 13 km pendant qu'il s'éloignait de la station de transmission. Ensuite, tout enregistrement ayant définitivement cessé, le remorqueur retourna sur sa route ; mais, étant arrivé de nouveau à la distance de 13 km, le récepteur ne parut pas être impressionné par les perturbations que le transmetteur ne cessait de rayonner autour de lui. Il fallut diminuer encore de beaucoup la distance entre les deux appareils, pour que la machine pût recommencer à enregistrer les signaux composant la correspondance.

L'explication de ce phénomène étrange n'est peut-être pas une chose très simple. Ce jour-là, on crut devoir la fonder sur l'observation suivante :

Le conducteur aérien d'émission n'était pas parfaitement vertical ; il se développait en formant une certaine courbe un peu irrégulière dans un plan vertical dirigé

approximativement vers le N.-E., parce que, près de terre, il se détachait de quelques mètres du pied du mât auquel il était fixé.

Le conducteur aérien de réception s'élevant de la gauche de la poupe de remorqueur vers le bout du mât, qu'on avait érigé derrière la cheminée, avait à peu près la même allure.

Pendant l'éloignement du remorqueur vers le Sud, les deux conducteurs dirigeaient donc la concavité de leur courbe vers le même point du ciel, c'est-à-dire leurs directions moyennes étaient presque parallèles. Dans ces conditions, les effets de l'induction pouvaient atteindre à peu près l'efficacité maxima consentie par la distance et par la longueur des conducteurs.

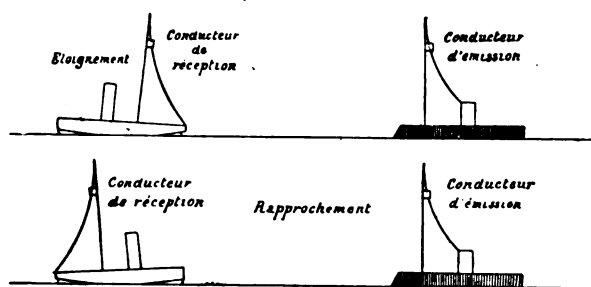


Fig. 27. — Direction des conducteurs aériens.

Mais, pendant le rapprochement du remorqueur, celui-ci étant orienté dans une direction contraire, les deux conducteurs dirigeaient leur concavité vers des points différents du ciel et assez éloignés entre eux, c'est-à-dire que leurs directions moyennes comprenaient entre elles un angle non négligeable. Dans ces nouvelles conditions, les effets de l'induction devaient nécessairement être inférieurs.

Un autre jour, le récepteur installé à bord d'un cuirassé, perçut les signaux transmis jusqu'à une distance de 18 km. Quand, après avoir vu qu'on ne pouvait espérer aucune réapparition des signaux, à cause d'un excès de distance, on retourna en arrière, il arriva encore qu'on atteignit la même distance de 18 km, sans que la correspondance fut pour cela rétablie. On passa même à des distances très-inférieures, sans obtenir aucun effet utile.

La plus grande hauteur des conducteurs aériens qui étaient, en outre, moins courbés et avec une direction moyenne plus proche de la verticale, l'érection plus soignée du conducteur de réception, étaient une partie de sa valeur à l'explication précédente. Mais une autre cause se présentait.

Pendant que le navire s'éloignait de la station de transmission, en dirigeant la poupe vers elle, le conducteur aérien de réception, dressé près de la poupe même, se trouvait placé entre cette station, les mâts métalliques et les cheminées métalliques du cuirassé. Dans ce cas, ces constructions réfléchissaient peut-être autour d'elles une petite partie de l'énergie électro-magnétique qui se propageait dans l'air, mais elles ne l'empêchaient pas d'arriver au résonateur.

Au contraire, pendant que le navire se rapprochait de la station de transmission, les mâts métalliques et les cheminées métalliques s'interposaient entre le conducteur d'émission et celui de réception ; et puisque l'on doit accepter que les masses métalliques sont toujours un écran partiel aux radiations électro-magnétiques, de quelque longueur d'ondes qu'elles soient, il faut croire que ces mâts et ces cheminées absorbaient une partie de l'énergie électro-magnétique qui, pour cela, ne pouvait plus être recueillie par le circuit de résonance.

Il ne faut pas, toutefois, rejeter une autre cause probable : les relais présentent presque toujours un inconvénient ; excités à courts intervalles de temps, ils se maintiennent d'une sensibilité qui dépend des soins apportés dans leur construction ; laissés quelque temps inactifs, ils acquièrent une certaine inertie, à cause de laquelle ils ne répondent pas immédiatement à un premier appel avec l'intensité ordinaire de fonctionnement, mais exigent une excitation plus puissante pour se déterminer à fonctionner. A cette inertie s'ajoute l'hystérésis magnétique dans les relais non polarisés.

M. Marconi connaissait si bien cette circonstance, qu'il ne manquait jamais, au cours de ses expériences, de *réveiller* de temps en temps son coherer au moyen d'une pile et d'une sonnerie locale, c'est-à-dire avec le même système dont il se servait pour *régler* le relais au commencement des expériences.

Or, il pouvait bien arriver que la distance maxima de transmission ayant été dépassée, et le fonctionnement du résonateur ayant été suspendu pour quelque temps, quand le navire commençait à se rapprocher de la station de transmission, le relais se trouvât dans une période de cette inertie spéciale et concourût aussi à empêcher la correspondance.

Mais il est certain, que, des trois raisons indiquées, l'interposition de masses métalliques entre le radiateur et le résonateur était la cause la plus sérieuse de l'interruption de la correspondance.

Ceci résulte encore de ce que ce fut avec le cuirassé, plus riche que le remorqueur en parties métalliques, que le phénomène s'accrut davantage, si bien qu'on dut retourner à la distance de 12 km pour rétablir la correspondance suspendue à 18 km pendant l'éloignement.

ESSAIS DE CORRESPONDANCE A L'INTÉRIEUR D'UNE VILLE.

Prié par M. le professeur Eric Gerard de diriger la construction d'*appareils de démonstration* de la télégraphie sans conducteurs de ligne, j'ai pu essayer la correspondance entre l'Institut électro-technique Montefiore et le nouveau local de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de cet Institut, à une distance qui n'est pas excessive, mais dans des conditions qui méritent d'être connues.

Le transmetteur ordinaire comprenait cinq accumulateurs Tudor, une clef, une bobine de Ruhmkorff actionnée par un interrupteur ordinaire à lame élastique, capable de donner des étincelles de 11 cm de long avec un courant primaire efficace de $3\frac{1}{2}$ ampères, et un radiateur assez simple.

Dans mes tous premiers essais, tant que je ne sortais pas avec le récepteur de l'Institut, où le transmetteur est toujours resté installé, je pus me servir sans inconvénient d'un radiateur constitué par deux boules pleines en laiton, ayant un diamètre de 12 cm, noyées dans de l'huile de vaseline, écartées variablement l'une de l'autre de 1 à 2 mm, placées directement l'une au-dessus de l'autre et mises en communication, au moyen de deux grosses tiges, avec deux tiges minces verticales en laiton, découvertes, d'un diamètre de 3 mm, dont la supérieure avait une longueur de $2\frac{1}{2}$ m environ et l'inférieure une longueur de 1 m seulement. Deux plaques de cuivre circulaires, d'un diamètre de 60 cm environ, enfilées par le centre sur ces tiges plus minces, et maintenues horizontales par quatre petites flèches métalliques aboutissant à un anneau portant une vis, pouvaient être déplacées selon la verticale, de façon à varier la capacité électro-statique du système. Dans ce premier cas, la distance de transmission

n'atteignit jamais une valeur suffisante pour permettre de remarquer la moindre variation dans l'efficacité du radiateur, quelle que fût la distance entre les deux plaques, de 60 cm à 3 m.

Dans d'autres essais, quand je transportai le récepteur hors de l'Institut et que je l'installai au siège de l'Association, je remplaçai les deux tiges minces en laiton par deux conducteurs verticaux en cuivre ayant un diamètre de $1\frac{1}{2}$ mm environ, recouverts d'un isolant. Le conducteur supérieur avait une longueur de 10 à 12 m ; le conducteur inférieur une longueur de 5 à 6 m. Aux deux extrémités opposées, éloignées de 15 à 18 m l'une de l'autre, étaient fixées horizontalement les deux plaques de cuivre décrites ci-dessus.

Mais, dans ce cas, je ressentis les effets nuisibles des bulles de gaz qui se dégageaient dans l'huile de vaseline, et qui rendaient souvent insuffisante l'énergie de la décharge. Je dus alors substituer aux deux boules de 12 cm, deux boules de $3\frac{1}{2}$ cm de diamètre, que je plaçai dans l'huile l'une à côté de l'autre, tout en conservant aux deux tiges de support la direction verticale. Ces deux petites boules étaient séparées par un intervalle qui varia de 3 à 4 mm.

Indépendamment de ce transmetteur, j'en composai un plus petit avec un seul petit accumulateur, une clef, une petite bobine d'induction capable de donner des étincelles de $1\frac{1}{2}$ cm et un radiateur dont je variaï souvent la forme et les dimensions.

Ce radiateur se composa, maintes fois, de deux bandettes de cuivre d'une largeur de 2 cm et d'une longueur variable entre 60 et 40 cm. Elles étaient coupées en pointe aux extrémités en regard, que je tenais éloignées d'un mm à peu près.

D'autres fois, ce radiateur se composa de deux bandelettes de cuivre d'une largeur de 4 mm et d'une longueur de 50 cm, également façonnées en pointe aux extrémités en regard. Ces bandelettes portaient encore, aux deux extrémités opposées, des plaques de cuivre placées dans le plan des deux bandelettes et ayant une superficie de 18 cm sur 24 cm environ.

J'estime que le radiateur du transmetteur ordinaire, composé principalement de deux boules de 12 cm et de deux tiges ayant une longueur totale de 3,50 m, devait engendrer des oscillations ayant une longueur d'onde de 7 à 9 m; que le radiateur, composé principalement de deux boules de 3 $\frac{1}{2}$ cm et de deux conducteurs ayant une longueur totale de 15 à 18 m, devait engendrer des oscillations ayant une longueur d'onde de 30 à 50 m.

Quant à la longueur d'onde des radiations produites par les différents excitateurs que j'adaptai au transmetteur de petit modèle, elle dut varier de 1,50 à 3 m.

Ces données, quoique calculées assez grossièrement, ne doivent pas être oubliées pour juger de l'importance de l'accord entre le radiateur et le résonateur, d'après les faits que j'exposerai.

Le récepteur, unique, se composait d'un tube sensible du genre de ceux que j'ai dit plus haut avoir construits; de deux appendices semblables à ceux qui étaient adaptés au transmetteur ordinaire; d'un élément Leclanché humide pour faire fonctionner un relais de construction rudimentaire; de cinq éléments Leclanché pour actionner une machine Morse ordinaire et un interrupteur à trembleur de construction aussi assez grossière, et de trois voltamètres ou résistances liquides, ayant le but indiqué ailleurs.

J'ai dit que les appendices du coherer étaient semblables à ceux qui, avec les boules, composaient le radiateur.

Pendant les essais à l'intérieur de l'Institut, ils étaient donc constitués par deux tiges de laiton minces, verticales et non isolées, le long desquelles on pouvait déplacer deux plaques de cuivre circulaires horizontales.

Dans ces conditions, et pour n'importe quelle distance entre ces deux plaques, le récepteur ne laissa jamais remarquer aucune différence de sensibilité, quelle que fut la distance de correspondance dans les limites permises, tant qu'on l'excita avec le transmetteur ordinaire, appareillé n'importe comment.

Également, en employant le transmetteur de petit modèle, je trouvai dans l'Institut une limite de distance pour laquelle le récepteur cessait d'être sensibilisé ; mais je ne pus déterminer, avec certitude, si cette limite variait vraiment avec la forme et les dimensions du radiateur employé. En somme, je n'eus pas tout au moins le moyen d'apercevoir dans le résonateur un effet tangible des variations de la fréquence des oscillations engendrées par le radiateur.

Un autre fait remarquable, c'est que, ayant placé le transmetteur, petit modèle, sous le toit, dans un local tout entouré de pièces métalliques, les oscillations électro-magnétiques produites sortirent de cette espèce de cage conductrice et traversèrent plusieurs murs, en affectant le récepteur placé au même étage.

Pendant les essais entre l'Institut et les locaux de l'Association, les appendices du coherer étaient constitués, au contraire, par deux longs conducteurs verticaux isolés, aux extrémités opposées desquels on avait fixé horizontalement les deux plaques circulaires de cuivre.

Le relais employé se composait d'un électro-aimant en fer à cheval, placé verticalement avec les pôles en haut. Cet électro-aimant commandait une armature munie

d'une longue tige très-mince en aluminium, pliée en équerre et qui fermait le circuit de secours, en plongeant dans un godet à mercure. L'appareil était un peu grossier, mais on avait soigné la construction du pivot et de la suspension (faite avec un ressort à boudin) de l'armature. L'enroulement était fait avec du fil très long et très mince. Au relais était adapté un premier voltamètre à eau.

L'interrupteur employé se composait aussi d'un électro-aimant en fer à cheval, placé verticalement avec les pôles en haut. Cet électro-aimant agissait sur une armature soutenue par un ressort à lame. L'armature portait une longue tige de cuivre, munie d'une petite boule en laiton qui frappait directement sur le coherer. La tige portait à son tour un petit ressort, auquel était soudée une petite plaque en laiton qui devait composer, avec une vis, le contact intermittent. La rupture de ce contact devait se produire avec un retard sensible, par rapport à la mise en mouvement de l'armature, et cela, pour augmenter la course du système et donner une force vive suffisante au marteau, de manière qu'il ne manquât pas de renouveler la résistance de la limaille contenue dans le tube. L'enroulement était fait avec un fil moins long et moins mince que celui employé dans la construction du relais. L'interrupteur fut moins bon que le relais, à cause de l'inertie plus grande de ses différentes parties qui en ralentissait le fonctionnement.

Dans la machine Morse, j'avais ajouté, à l'ongle qui trace les caractères alphabétiques, une petite pièce courbe en laiton, pour allonger les points tracés sur le papier télégraphique. Je pensais pouvoir donner ainsi aux pointillés l'apparence des traits continus qu'ils devaient représenter.

La disposition en parallèle de la machine et de l'interrupteur m'aurait permis de me servir d'une seule résis-

tance à eau pour étouffer les effets des extra-courants produits par la self-induction des enroulements des deux appareils ; mais je préférerais en adopter une à chaque enroulement pour en déduire, s'il était possible, une relation visible entre les éléments des enroulements et les éléments des résistances à eau. Toutefois, les observations faites sur les trois voltamètres du récepteur ne me conduisirent à formuler aucune règle pratique concernant la distance à ménager entre les électrodes des voltamètres et la résistance et self-induction des enroulements des électro-aimants. On sait bien déterminer théoriquement quelle capacité est nécessaire pour compenser une self-induction donnée, mais on ne sait pas évaluer avec certitude la capacité représentée par un voltamètre à eau (condensateur à diélectrique imparfait).

C'est donc avec les appareils que je viens de décrire que j'ai essayé d'obtenir la correspondance télégraphique dans la ville, entre l'Institut électro-technique (rue Saint-Gilles) et le siège de l'Association (rue du Pot-d'Or). La distance entre les deux établissements n'est que de 300 m environ ; mais, entre ces deux établissements, s'élèvent une dizaine de constructions, parmi lesquelles une assez vaste et très haute, contenant un hôtel (Hôtel Métropole).

Le transmetteur et le récepteur étaient installés tous les deux au premier étage ; les conducteurs aériens de tous les deux montaient jusqu'au toit *sans le surpasser* ; les conducteurs inférieurs de tous les deux descendaient jusqu'au sol, *sans faire terre*. Les deux conducteurs isolés de chaque appareil sortaient à travers des trous ménagés dans le châssis des fenêtres et longeaient verticalement la surface extérieure des bâtiments à une distance de 60 cm environ.

Le radiateur et le résonateur pouvaient se dire placés

que la correspondance avait à craindre l'obstacle le plus important, mais plutôt de la part des nombreuses canalisations métalliques qui s'y trouvaient, comme les tuyaux en zinc, en fonte, en plomb, pour la décharge de l'eau pluviale et pour la distribution de l'eau alimentaire et du gaz, comme les conducteurs en cuivre pour le service de l'éclairage électrique.

Dans ce sens, j'aurais cru très embarrassant l'existence de l'hôtel mentionné, exactement sur la direction joignant les deux locaux. Puis j'aurais cru également nuisible la présence d'un toit métallique sur la même ligne.

J'avais craint aussi l'existence d'une station de trams électriques dans le voisinage (pont d'Avroy), à cause des fortes variations de courants que l'on a, pendant les arrêts et les démarrages des voitures, le long des mâts de trolley et d'autres conducteurs qui ont une composante verticale.

Au contraire, l'existence des conducteurs fixes d'alimentation des trams ne me préoccupait guère; à cause de leur direction généralement horizontale, ils ne pouvaient certainement pas produire des effets d'induction sur le résonateur étendu verticalement.

Malgré ces conditions défavorables, la correspondance fut établie heureusement, signe que le réseau des conducteurs interposés entre le transmetteur et le récepteur n'avait pas les mailles assez serrées pour empêcher la propagation de l'énergie électro-magnétique ou, au moins, pour en dissiper une partie trop forte.

Pendant quelques jours de pluie, les couches d'eau étendues sur les façades des maisons interposées ne furent pas plus nuisibles que les canalisations métalliques.

Il me faut noter que, pour montrer le récepteur et son fonctionnement à un grand nombre de personnes, je dus l'éloigner de la fenêtre près de laquelle il se trouvait

installé, et le porter même au centre d'une autre pièce. Je dus, partant, ajouter, entre les coherer et les conducteurs verticaux extérieurs, deux conducteurs horizontaux ayant chacun une longueur de 9 m environ. Cette disposition doublait la longueur du résonateur. La partie ajoutée, horizontale, n'était pas seulement inefficace (ne pouvant pas ressentir des effets d'induction de la part d'un radiateur ayant une direction générale verticale), mais était encore nuisible à cause de la résistance ohmique, de la capacité et de la self-induction qu'elle introduisait, de manière à allonger la période propre du résonateur et à rendre plus rapide l'amortissement des oscillations induites.

Malgré tout, le récepteur se laissa très-bien exciter à distance par le transmetteur ordinaire et de près par le transmetteur de petit modèle, qui me servait à rendre plus complète la démonstration du système télégraphique sans sortir des locaux de l'Association.

CONSIDÉRATIONS FINALES.

Les choses en étant au point actuel, il résulte de tout ce que je viens de dire que le système télégraphique Marconi n'est pas sans inconvénients.

J'ai essayé de persuader que l'accord parfait de la période propre du circuit de réception avec celle du circuit d'émission est bien loin d'être indispensable. Cet accord peut conférer une plus grande sensibilité au récepteur et augmenter quelque peu la distance de transmission, mais un désaccord même considérable ne peut pas empêcher un résonateur de ressentir l'action d'un excitateur, même à une grande distance de celui-ci. Rien n'empêche donc, à moins que l'on n'adopte des dispositions appropriées, qu'un résonateur ne perçoive les signaux émis en même temps par plusieurs radiateurs se

trouvant dans un certain rayon. Une telle circonstance rendrait certainement impossible toute correspondance. Cet inconvénient est même bien plus à craindre que celui qui se présente dans les usages militaires de la télégraphie sans fil : un mal intentionné, l'ennemi, peut surprendre les communications et avoir connaissance des dépêches électro-magnétiques. Mais, à ce dernier inconvénient, on pourrait facilement parer en employant, dans la télégraphie sans fil comme dans la télégraphie optique des sémaphores, deux codes différents, un code international pour les communications d'ordre général, un code secret pour les usages de guerre.

Reste donc l'inconvénient plus grave de l'entrelacement des signaux.

Les efforts des expérimentateurs devraient donc être dirigés vers le but de trouver au moins un moyen de *borner* les radiations électro-magnétiques destinées à la correspondance dans des régions de l'espace assez exiguës pouvant être convenablement dirigées, au besoin, sans s'occuper de les *concentrer* dans ces régions, comme on le fait dans la télégraphie optique ordinaire et comme on pourrait le faire facilement dans la télégraphie sans fil, s'il n'était pas indispensable d'employer des radiateurs très-étendus. D'ailleurs les fortes dimensions à donner aux projecteurs capables de s'adapter aux longs radiateurs dont on doit se servir, ne paraîtront peut être pas toujours un obstacle à leur usage, au moins dans les stations fixes. En tous cas, il serait facile, pour le but plus restreint indiqué tantôt, de construire des *intercepteurs* assez légers et peu encombrants en utilisant les propriétés des treillis cylindriques que j'ai indiquées ailleurs. Évidemment, la construction de ces treillis exigerait certaines précautions particulières, pour éviter qu'ils puissent affaiblir les radiations principales dans le secteur utile en leur super-

posant des radiations secondaires nuisibles. Les fils du treillis, parallèles au conducteur aérien, c'est-à-dire verticaux, devraient être interrompus par des coupures ou par de petites bobines à forte self-induction, afin de diminuer l'intensité et de changer totalement la période des oscillations électriques induites sur leur longueur.

On a écrit dans plusieurs journaux que le système de M. Marconi pour provoquer des actions électriques à distance sans communication matérielle pouvait s'appliquer à l'explosion des magasins à poudre des navires de guerre de l'ennemi. Ceci est tout-à-fait impossible parce qu'il faudrait préparer plusieurs choses dans ce but. On peut certes provoquer des étincelles par induction ; mais une étincelle sensible demande une quantité d'énergie qui ne saurait pénétrer à une distance considérable dans un réduit blindé ; et une étincelle microscopique, si encore il pouvait s'en former, ne saurait pas élever suffisamment la température du moindre grain d'explosif situé sur son passage.

Aussi, si l'on voulait appliquer le système à l'explosion de mines expressément préparées, ce qui peut se faire sans grandes difficultés, il faudrait prédisposer un résonateur contenant un coherer et relier aux deux bouts de celui-ci un circuit local contenant une pile et une amorce. Le coherer, ne devant fonctionner qu'une seule fois, ce seul circuit suffirait. Une perturbation électro-magnétique recueillie par le résonateur fermerait le circuit d'inflammation. Ce moyen servirait aussi bien pour les mines dans la terre que pour les torpilles dans l'eau. Ce serait un moyen d'une extrême simplicité qui dispenserait de la construction de toute ligne et qui assurerait la simultanéité d'explosion de toutes les mines. Mais, pour cela même, il ne conviendrait pas là où il y aurait des mines à faire éclater successivement, à moins que l'on ne parvienne

à résoudre le problème des projecteurs ou des intercepteurs.

Le nouveau système de provocation d'actions électriques à distance sans liaison matérielle pourrait encore servir dans un grand nombre d'applications : il pourrait desservir toute espèce d'avertisseurs, pourvu toujours qu'on réussisse à éviter la possibilité qu'un résonateur soit influencé par un excitateur différent de celui par lequel seulement on veut qu'il soit actionné.

Peut-être pour y parvenir, faudrait-il recourir à des fréquences plus élevées, ce qui serait permis eu égard à la distance à franchir, qui, dans ces applications, serait certainement moindre qu'en télégraphie. Avec les fréquences plus élevées, l'accord du récepteur avec le transmetteur viendrait à reconquérir son importance et dispenserait peut être de l'emploi de projecteurs, qui, toutefois, seraient toujours un élément de garantie.

C'est de cette façon qu'on pourrait mettre en marche les horloges d'une ville, qu'on pourrait allumer les becs de gaz, qu'on pourrait desservir les avertisseurs d'incendie, etc.

Quant à la vraie correspondance télégraphique sans fil, elle pourrait être utilisée de plusieurs manières : dans les communications des côtes avec les navires, ou bien le long des côtes, ou entre les navires ; dans les communications des gares avec les trains en mouvement, ou bien entre ces trains mêmes. Elle pourrait se substituer à la télégraphie ordinaire là où l'établissement et la conservation des lignes télégraphiques présentent de sérieuses difficultés : ainsi, au travers des canaux très agités, sur des terrains très accidentés et ravagés par les bourrasques. Mais elle ne remplacera jamais complètement la télégraphie ordinaire, car, à part toute question de distance, elle

sera toujours plus lente et moins sûre que la télégraphie ordinaire, qui sait déjà si bien utiliser le moindre fil de communication et qui, jalouse, ne s'arrêtera pas sur le chemin du progrès.

Toutefois, sans qu'elle ait besoin d'aspirer à un but aussi élevé, la nouvelle télégraphie qui est à peine à son enfance et qui ne tardera pas à grandir, a devant elle un horizon très étendu. Sans parler de ses applications aux usages militaires, qui sont les moins utiles à l'humanité, cette télégraphie optique qui ne craint pas le brouillard, a pour elle le domaine de la mer, où elle pourra développer largement une œuvre bienfaisante, en communion avec les phares des côtes et les projecteurs de navires, une œuvre utile, en communion avec les sémaphores et les télégraphes sous-marins. (*Applaudissements.*)

Au cours de sa conférence, M. Della Riccia montre à l'assemblée le récepteur Marconi établi dans la salle et reçoit des signaux émanant d'un transmetteur établi à l'Institut Montefiore. La distance entre les deux postes n'est que de 300 mètres environ, mais on y rencontre des pièces métalliques nombreuses, ce qui, toutefois, ne fait pas obstacle à la transmission, ainsi que tous les assistants ont pu s'en convaincre.

M. Montefiore, *président d'honneur*, avant de lever la séance, félicite le conférencier de la clarté avec laquelle il a exposé son travail, et le remercie au nom de l'assemblée d'avoir inauguré la salle de réunion par une étude aussi remarquable que la sienne. (*Applaudissements.*)

CHRONIQUE.



Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Bede, Philippe, avec M^{lle} Gabrielle Gondrexon, celui de notre camarade M. Calmeau, Léon, avec M^{lle} Alice Coopman, et celui de notre camarade M. Goldschmidt, Henri, avec M^{lle} Marie Deutsch (de la Meurthe).

Institution d'une Commission consultative pour l'application de l'électricité aux travaux des mines et carrières :

Le Ministre de l'Industrie et du Travail,

Vu l'arrêté royal du 15 mai 1895 concernant l'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains des mines, minières et carrières ;

Considérant qu'il importe que les pouvoirs auxquels donne lieu l'application des prescriptions de cet arrêté soient examinés dans une unité de vue ;

Arrête :

Art. 1^{er}. — Une Commission consultative est instituée à l'Administration centrale du Département, pour examiner les affaires concernant l'application de l'électricité aux travaux souterrains des mines et des carrières, et qui leur seront soumises par le Ministre.

Art 2. — Cette Commission est composée comme suit :

MM. J. Libert, ingénieur en chef directeur des mines,
à Namur, *président* ;
S. Stassart, ingénieur des mines, à Mons ;
V. Firket, ingénieur des mines, à Liège ;
A. Halleux, ingénieur des mines, à Bruxelles,
secrétaire.

Art. 3. — Le mandat des membres de cette Commission est de 3 ans.

Bruxelles, le 26 mars 1898.

NÉCROLOGIE. — CHARLES VAN KESTEREN. — A peine entré dans la carrière d'ingénieur, alors qu'il allait recueillir le fruit de ses fortes études et que l'avenir se présentait à lui plein de promesses, notre camarade Charles van Kesteren a succombé le 21 avril 1898 à un mal dont nul ne soupçonnait la gravité.

M. van der Wallen, au nom de l'Association, a adressé en ces termes un suprême adieu à notre camarade regretté :

Messieurs ,

Une mort pour ainsi dire foudroyante vient de frapper, dans la pleine maturité de son talent, un des nôtres. Le défunt que je viens conduire à sa dernière demeure était pour moi non-seulement un collègue estimé, mais aussi un ami bien ancien.

Né à Java, le 21 septembre 1871, Charles van Kesteren se distingua dès le début de ses études, où il montra une aptitude spéciale pour les mathématiques et les sciences positives.

Entré en octobre 1888 second à l'école des mines de Liège, il y fit des études aussi brillantes qu'étendues. Il en sortit en octobre 1894 avec le grade d'ingénieur civil des mines qu'il obtint avec distinction. Le même mois, nous le retrouvons à l'Institut Montefiore, d'où il sortait l'année suivante.

Il débuta dans la vie pratique par les Ateliers de construction de M. Bollinckx, qu'il quittait quelques mois

après pour entrer à l'« Union Elektrizitäts Gesellschaft ». Son séjour dans cette Société ne fut pas bien long, car, en janvier 1897, la Société anonyme pour la fabrication des cartouches et projectiles lui confiait la place de sous-directeur des usines d'Anderlecht.

La diversité des branches qu'il pratiqua en si peu de temps fit qu'il eut des débuts quelquefois difficiles. Il n'était pas homme à reculer devant la peine ; le travail le stimulait au travail et son activité grandissante sut triompher de tout.

Cette grande facilité d'assimilation, cet esprit d'observation sagace, cet enthousiasme réfléchi pour les choses nouvelles, cet amour du progrès étaient chez lui des dons naturels.

Il se plaignait parfois de ce que sa santé ne lui permit point de faire davantage. Sa volonté d'acier ne put pas toujours maîtriser un corps qui, parfois, défaillait sous le poids des occupations.

Notre Association lui doit une des plus intéressantes communications de l'an dernier. Sa belle étude sur la construction des lignes de tramways à traction électrique montre qu'il possédait à fond ce sujet qui avait fait, depuis sa sortie des écoles, l'objet de toutes ses recherches.

Il apportait dans ses travaux personnels une ardeur juvénile. Travailleur des plus consciencieux, il n'épargnait aucune peine pour arriver à la détermination de la vérité scientifique. Quand il pensait avoir réussi, il défendait sa conquête avec un soin jaloux. Était-il engagé dans une discussion, il s'animait à développer ses idées devant ses amis, il s'imposait un travail forcé, il s'astreignait à de longues veilles pour trouver une réponse à toutes les objections. C'est au cours de cette grande activité qu'il réalisa un projet qu'il avait conçu quand il était encore

étudiant ; il épousa le 21 avril 1897 M^{lle} Lucie Masion, fille de M. Masion, si connu à Bruxelles.

Cette union donna à notre cher collègue tout le bonheur que son jeune cœur avait rêvé : son épouse savait apprécier toute la valeur de celui dont elle partageait le sort et avait pour lui un véritable culte ; elle admirait ses efforts, l'encourageait avec ce tact intelligent qui distingue la femme d'esprit, et partageait bien pleinement la joie des succès. Malheureusement ces beaux jours furent de courte durée ! Un an après, jour pour jour, il succombait inopinément à une cruelle affection qui le minait depuis plusieurs années.

Si des regrets unanimes pouvaient calmer les angoisses de ceux que cette mort a le plus cruellement atteints. ah ! je dirais que nul ne fut plus aimé, nul n'est plus regretté !

Citerai-je d'autres événements pénibles qui survinrent dans l'existence de van Kesteren ? Je ne le puis : je ne viendrai pas, dans cette circonstance, dévoiler ce que l'amitié me confia, car je devrais blesser la modestie de celui qui n'est plus. Mais ce que je puis dire ici, bien haut, c'est que le cher défunt avait un grand et noble cœur.

Tous ceux qui l'ont connu ont pu apprécier la droiture de son caractère, le charme de ses relations, la bienveillance de son esprit ; aussi, nombreux sont les amis qui sont aller lui témoigner une dernière marque d'affection et rendre un suprême hommage à ses brillantes qualités.

Vous n'êtes plus, cher ami, mais votre nom restera ; il vivra à jamais parmi vos collègues, entouré de cette estime affectueuse que nos cœurs accordent à ceux qui, comme vous, ont su honorer notre Association.

SÉANCE DU 27 MARS 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Aragon, Batigne, Bodde, Bouva, Briffaux, Caldarera, Callet, Centonze, Cheftel, Cousin, Crudenaire, De Bast, Della Riccia, Delori, Del Proposto, de Metz, de Waal, Foucault, Gerard Amédée, Hefter, Herzen, Hoogwinkel, Jakouboff, Leguillon, L'Hoest, Mari, Martin Gabriel, Masson, Maternowski, Maus, Micha, Nuzzaci, Ottavi, Passet, Polivanoff, Raudot, Riboni Carlo, Roland, Roussakoff, Schmidt, Van de Capelle, Van der Wallen, Wilkin, Zocchi

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

M. Del Proposto, président. — Une imposante manifestation aura lieu aujourd'hui à Bruxelles, sous la présidence de M. le sénateur Montefiore, en l'honneur du grand technicien belge, M. Gramme, un des créateurs de l'industrie électrique contemporaine. Votre Comité a pensé répondre à votre désir unanime en vous proposant, à cette occasion, d'inviter M. Gramme à accepter le titre de membre honoraire de notre Association. (*Applaudissements.*)

— Cette proposition est adoptée à l'unanimité des membres présents.

M. Del Proposto, président. — Votre résolution sera transmise par télégramme à notre vice-président d'honneur, M. le professeur Gerard, avec prière de la communiquer au cours de la manifestation de ce jour.

La parole est donnée à **M. de Waal** pour sa communication sur

Les accumulateurs à poste fixe dans les usines de force.

Avant de vous présenter les notes suivantes que j'ai recueillies, je tiens à vous dire qu'elles ne forment en

réalité que le résumé d'un discours prononcé par M. Schroeder, Ingénieur en chef à l'A. F. A. G. de Berlin. — Je vous les présente donc sans la moindre prétention quant à l'originalité.

Aujourd'hui, l'accumulateur est considéré à juste titre comme un complément indispensable d'une usine de lumière à courant continu par suite des avantages multiples que procurent son installation, avantages connus de vous tous et qui sont la cause de la supériorité indiscutable des stations à courant continu sur celles à courants alternatifs en ce qui concerne le rendement de l'usine.

Dans cet ordre d'idées l'introduction d'une batterie dans une usine de force fut émise vers 1890, si je ne me trompe pas, par l'ingénieur bruxellois M. Van Vloten ; ce ne fut pourtant qu'en 1894 que l'accumulateur à poste fixe débuta dans une station de tramway.

C'était pour l'usine de Zürich, en Suisse, que l'on se décida à installer une batterie d'accumulateurs, afin de régler la tension de la ligne aérienne qui subissait d'énormes variations par suite de fortes fluctuations dans le courant que la machine avait à débiter eu égard au petit nombre de voitures que comportait l'entreprise et au terrain très accidenté.

Au début, on installa un réducteur-adjoncteur automatique afin de tenir la tension de la batterie en concordance avec celle de la machine, mais comme on remarqua bientôt que la batterie n'était alternativement en charge et en décharge que pendant quelques secondes, c'est à dire que sa tension était constante, on essaya au commencement de 1896 de renoncer à tout appareil régulateur. L'essai donna entière satisfaction et depuis lors la batterie de 270 éléments Tudor est couplée directement avec la dynamo, dont le voltage ne subit que des variations très restreintes, c'est à dire de 535 à 560 V. Les durées des

charges et des décharges consécutives doivent, en effet, être très faibles, puisque la tension par élément est constamment de 2 V., et l'on sait que celle-ci tombe rapidement de 2,6 à 1,9 V.

Ce mode de fonctionnement de la batterie qui met celle-ci alternativement, et à des intervalles très rapprochés, en charge et en décharge, est assez éloquemment indiqué par le nom de « batterie-tampon », faisant allusion à un ressort, tour à tour comprimé et détendu, parant ainsi aux secousses.

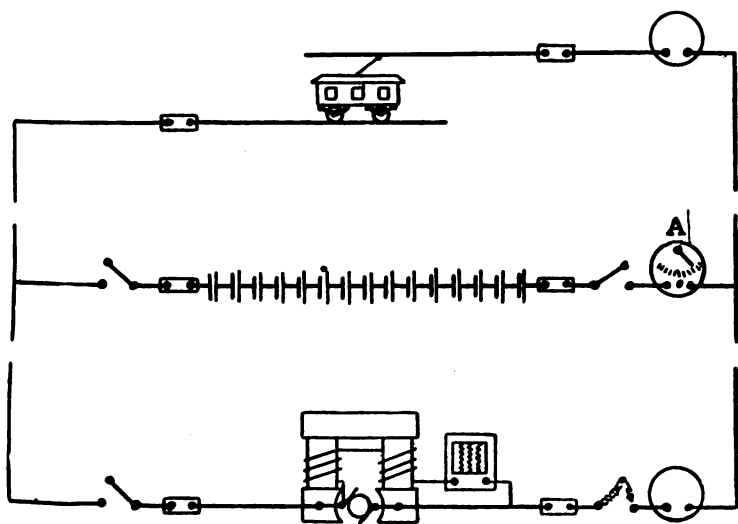


Fig. 1.

La fig. 1 indique la disposition de l'usine, tandis que la fig. 2 montre les courbes d'intensité et de force électromotrice : la courbe *ab* représente l'intensité du courant sur la ligne, elle varie entre 20 et 210 Amp., les crêtes *ss* et *tt* correspondent aux départs de 6 en 6 minutes aux deux bouts de la ligne. La courbe *cd* représente l'intensité du

courant de la dynamo, la valeur moyenne est de 90 Amp. tandis que les fluctuations vont de 72 à 102 Amp. La tension de la ligne, représentée par *ef* est remarquablement constante, elle ne varie que de 535 à 510 V., et encore cette différence maxima ne s'est accusée qu'une seule fois dans l'espace de 24 minutes.

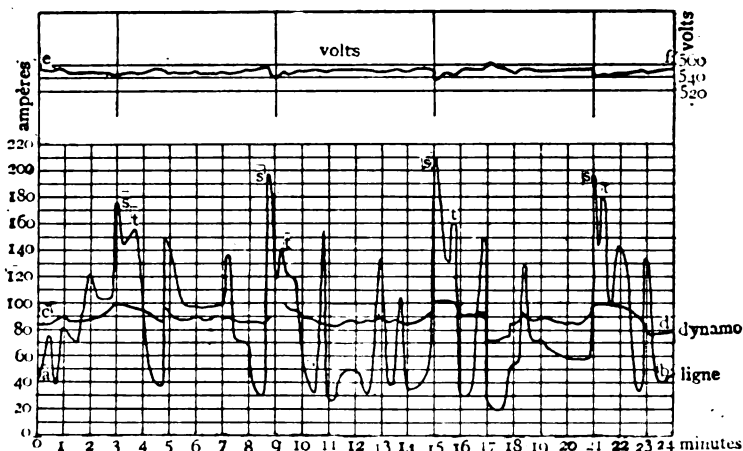


Fig. 2.

Il s'en suit des courbes du courant et de la tension que les machines travaillent à charge constante, c'est à dire dans la condition idéale, permettant dans les usines de force, même à faible puissance, l'installation de machines à vapeur à marche lente du type Corliss, plus économiques que les machines à grande vitesse qui, seules, étaient d'application toutes les fois où l'entreprise ne comprenait pas un nombre de voitures assez grand pour que la consommation instantanée d'énergie ne fut plus influencée par les démarrages, les passages en courbes et le profil de la voie.

Ce qui en somme est encore bien plus éloquent que les courbes reproduites, c'est la facture du charbon brûlé : elle indique que l'installation de la batterie a réduit la consommation de combustible jusqu'à 1,5 kg. par cheval-heure, débité à l'usine, résultat vraiment très satisfaisant. Il est vrai qu'en d'autres lieux, à Brème par exemple, la consommation de charbon ne dépasse non plus ce chiffre, mais il ne faut pas perdre de vue que Brème est située dans la plaine, tandis que Zürich se trouve dans la montagne, que la station de Brème a 300 chevaux, tandis que Zürich n'en a que 80, et qu'à Brème les machines sont à condensation, ce qui n'était pas le cas à Zürich.

Une application analogue est celle de Remscheid, pourtant si à Zürich on visait avant tout au maintien du voltage, le but qu'on se proposait d'atteindre à Remscheid était de se placer dans de meilleures conditions d'exploitation au point de vue financier. Les oscillations dans la puissance requise étaient tellement fortes qu'il y avait toujours en marche trois unités électro-mécaniques à 100 KW. alors que la puissance moyenne requise sur la ligne et dans une quarantaine d'ateliers n'était que de 116 KW., c'est à dire qu'une seule unité aurait été suffisante pour le cas où la charge eût été constante.

Avec les trois machines en service le KW-h. coûtait 4,3 kg. de charbon et il est facile à comprendre que dans ces conditions les bénéfices ne pouvaient être énormes. Le seul moyen de remédier à cet état de choses était l'installation d'une batterie d'accumulateurs, ce qui était d'ailleurs tout indiqué par suite de l'accroissement continu du nombre de petits moteurs installés dans des ateliers de mécanique de précision.

Il va sans dire que, dans le cas actuel, la batterie devait être une vraie batterie à capacité; elle était composée de

250 éléments Tudor, de 216 Amp. $\times$ 3 H, l'intensité maximum admissible était cependant de 420 Amp.

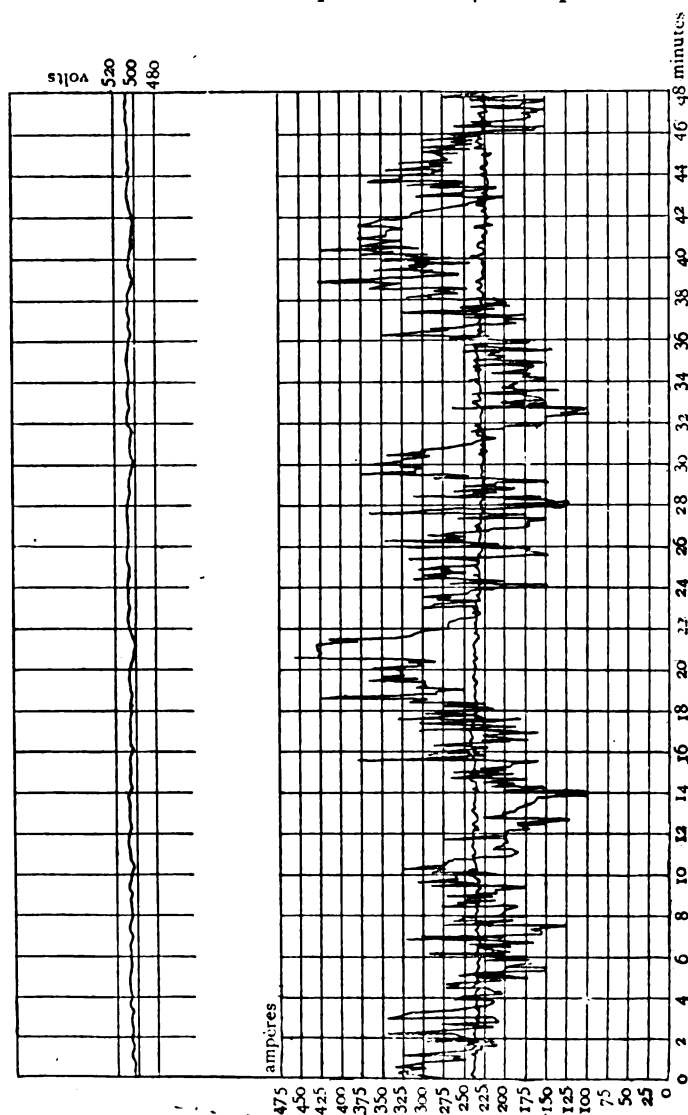


Fig. 3.

La fig. 3 représente les courbes d'intensité et du voltage pendant l'exploitation normale : le courant de la ligne varie entre 100 et 460 Amp., tandis que la valeur moyenne est de 232 Amp. Le courant de la machine ne varie qu'entre 210 et 255 Amp., et, le voltage étant remarquablement constant, les machines travaillent à charge constante, dont l'effet économique est démontré par une diminution dans la consommation de combustible de 4,3 à 2,8 kgs par KW-h, c'est à dire que l'installation de la batterie représente une économie annuelle de $3\,500 \times 1,5 \text{ kgs} \times 365 = 1\,910$ tonnes de charbon, soit 26 000 francs par an. Le prix de la batterie étant de 62 000 francs, celle-ci peut être amortie en deux ans et demi environ, rien que par l'économie de combustible qu'elle permet de faire.

Toutefois, ce n'est pas seulement cette économie de charbon qu'on doit à la batterie : par suite de la constance de la charge, une machine suffit où il y en avait auparavant trois en marche, c'est à dire que 200 KW. sont rendus disponibles pour alimenter des électromoteurs d'atelier. Ces 200 KW. en machines avaient coûté le double du prix de la batterie.

Le but qu'on se propose d'atteindre n'est donc pas toujours directement de maintenir la tension constante, quoique cet effet régulateur se présente toutes les fois où l'on procède à l'installation d'une batterie convenable en parallèle avec la machine.

A Brochenzell, en Wurtemberg, une batterie d'accumulateurs a fourni un moyen simple et peu coûteux d'agrandir considérablement et rationnellement la capacité de l'usine; la différence de ce but avec celui qu'on a visé à Zürich est évidente : si à Zürich la batterie pouvait être pour ainsi dire sans capacité, puisque les charges et décharges ne durent que des secondes et se succèdent

continuellement, il a fallu qu'à Brochenzell la batterie fût à même de fournir un certain travail.

Toutefois, comme la tension de décharge est de 650 V., une faible capacité correspond à un travail considérable, c'est ainsi qu'une petite capacité de 40 A.H. seulement suffit pour le transport de deux trains de 48 tonnes, exigeant 55 Amp. en moyenne pendant 22 minutes.

Comme la dynamo était à enroulement Compound, il a fallu supprimer l'enroulement à gros fil pour le couplage en parallèle avec la batterie. Étant construite pour une tension de 700 V. aux bornes correspondant à 2,2 V. par élément, elle suffisait à l'exploitation normale. Pourtant, une fois par jour, la batterie doit être chargée complètement, c'est à dire à 2,5 V. par élément. A cet effet, la

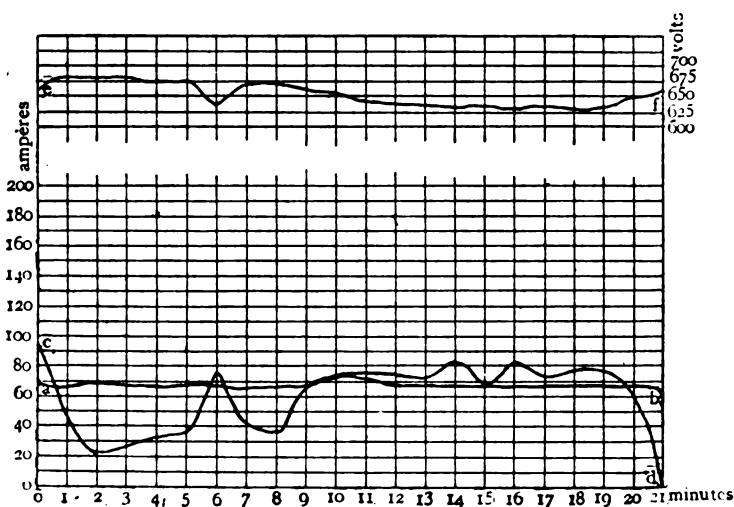


Fig. 4.

batterie est divisée en trois groupes *a*, *b*, *c* de 106 éléments, dont d'abord *a* et *b*, puis *a* et *c* et ensuite *b* et *c* sont mis

en série au moyen d'un simple coupleur. Cette charge complète dure de 15 à 30 minutes et se fait le soir après l'arrêt du service, puisque la tension de charge n'est que de 530 V., ou encore pendant la journée au moment où il n'y a pas de train en route. Par le dispositif très simple décrit ci-dessus, on évite de devoir faire usage d'un survolteur pour effectuer la charge complète de la batterie.

La fig. 4 représente les courbes du courant et de la tension obtenue pendant le fonctionnement en parallèle de l'accumulateur et de la dynamo qui est activée par une turbine à l'eau. Le poids du train est de 46 tonnes y

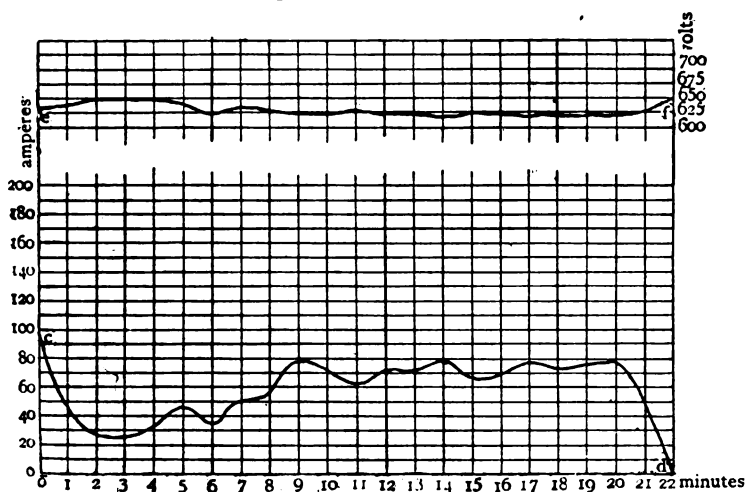


Fig. 5.

compris la voiture motrice, *ab* indique le courant de la machine, tandis que *cd* correspond au courant de la ligne. On déduit de ces courbes qu'il y a d'abord une charge pendant 5 minutes et puis une décharge de 11 minutes, il s'en suit que la variation de la tension sera plus forte qu'à Zürich; en effet, le voltage varie entre 630 et 680 V., mais il n'y a plus de chutes brusques en dessous de 300 V.,

ni les élévations rapides au dessus de 800 V., qui se produisaient avant l'installation de la batterie.

La fig. 5 représente les courbes obtenues pendant le transport d'un train de 48 tonnes, alors que les machines sont au repos, la batterie seule fournissant l'énergie nécessaire. La consommation de courant sur la ligne est naturellement la même que celle indiquée dans la figure précédente, la tension présente encore moins de variations puisque la batterie est continuellement en décharge.

La fig. 6 montre les variations en cas du transport simultané de deux trains; cette marche de deux trains montant simultanément était auparavant absolument impossible et n'a pu se faire qu'après l'installation de la

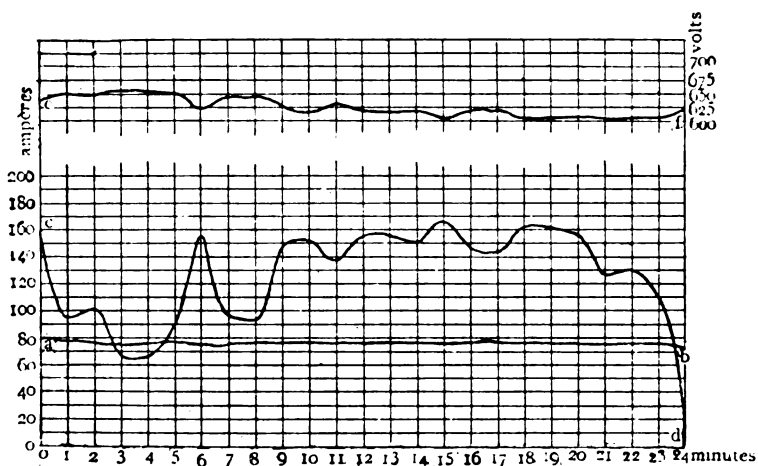


Fig. 6.

batterie. L'ensemble des deux trains représentait un poids de 93 tonnes. La tension varie entre 606 et 655 V. et la courbe du courant de la machine devient pour ainsi dire une ligne droite parallèle à l'axe des abscisses.

Les faits que je viens de vous signaler prouvent l'avantage incontestable que procure l'installation d'une batterie d'accumulateurs au point de vue de l'exploitation.

De plus, l'installation d'une batterie n'augmente nullement les frais de premier établissement, à condition, bien entendu, de choisir les machines relativement faibles. L'expérience a démontré que le courant sur la ligne, c'est à dire le courant pour lequel les machines doivent être construites afin de travailler à charge constante, n'est que la moitié du courant maximum de la ligne si le nombre des voitures ne dépasse pas la trentaine. Or, on peut compter dans ce cas que la puissance de la station doit être de 1 cheval-vapeur par tonne en marche, soit une dizaine de chevaux par voiture, tandis qu'il doit être possible de pousser cette puissance jusqu'à 14 chevaux par voiture au maximum. Ces chiffres se rapportent à une voie en palier ou ne présentant que de faibles rampes ; il sera souvent nécessaire de compter 20 chevaux par voiture selon le profil de la voie ; à Remscheid on a même installé 30 chevaux par voiture.

Supposons maintenant qu'il s'agit d'un tramway consommant 400 chevaux-vapeur au maximum, la puissance normale sera de $\frac{400 \times 100}{140} = 280$ chevaux. On les répartira sur deux machines à 140 chevaux, tandis qu'une troisième, de la même puissance, servira de réserve. En comptant le cheval-vapeur installé à 600 francs, l'usine coûtera :

$$3 \times 140 \times 600 = 252\ 000 \text{ francs.}$$

L'installation d'une batterie conduit, ainsi que nous l'avons indiqué, à des machines de puissance moitié moindre, c'est à dire qu'on aura à installer 200 chevaux et l'on choisira deux unités à 100 chevaux et une troisième unité de même puissance comme réserve. On installera

donc 300 chevaux, et comme ces unités sont plus faibles que celles dans l'hypothèse d'un service sans batterie, nous compterons le cheval-vapeur installé à 640 francs, ce qui donne :

$$3 \times 140 \times 640 \text{ frs.} = 192\,000 \text{ francs.}$$

Il reste donc 60 000 francs pour une batterie-tampon, ce qui suffira sans aucun doute dans beaucoup de cas qui pourront se présenter dans la pratique. (*Applaudissements.*)

M. le Président remercie le conférencier et demande si sa communication ne donne lieu à aucune observation.

M. L'Hoeft. — Existe-t-il un rapport consacré par l'expérience entre la puissance motrice moyenne et la capacité des batteries ?

M. De Waal. — Ce rapport est variable. Il dépend des irrégularités du débit et surtout du régime qu'on peut imposer au type d'accumulateur choisi.

M. Hefter succède à M. De Waal pour l'exposé de son travail sur

La soudure électrique en Russie.

Dans ce travail, je n'ai pas eu l'intention de donner la description complète de toutes les méthodes de la soudure électrique, mais seulement d'indiquer les principales, d'écrire quelques applications nouvelles et montrer les résultats obtenus surtout en Russie où ces méthodes sont très en vogue.

Méthode de Bénardos (*). — A l'endroit de la pièce qui doit être soudée on met de petits morceaux de fer que l'on couvre de sable ou d'une autre poudre à souder quelconque; parfois la poudre est extraite des plaques de Lapitte servant pour la soudure du fer à la forge.

On fond le fer au moyen de l'arc établi entre le charbon et les morceaux du métal, mis sur la pièce à réparer. Au moment où l'ouvrier aperçoit que le métal fondu a bien adhéré à la surface de la pièce, le courant est interrompu et on commence à forger le métal presque liquide. Ensuite on met une nouvelle couche de morceaux de fer et le travail continue par couches successives.

Pour mieux assurer l'adhérence du métal à la pièce on conseille d'établir l'arc entre la pièce et le charbon avant de déposer la première couche de fer, car sans cela l'adhérence est moins parfaite.

L'intensité du courant est déterminée par l'ouvrier d'après l'expérience. Quand le nombre d'accumulateurs est suffisant, l'arc produit un bourdonnement; quand on ne l'entend pas, c'est que l'intensité est trop faible; quand on entend un sifflement aigu, c'est que le nombre d'accumulateurs est trop grand. Il est nécessaire, pour que le métal

(*) *Soudure électrique par méthode de Slavianoff*. GERKEN, ing., 1896.

Soudure électrique par méthode de Slavianoff. Revue technique, 1891, n° 11.

Usine de Perme, par CHOUDIAKOFF, id., n° 10.

XV^e Congrès des ingénieurs de chemins de fer. Compte rendu par GETZ.

XIV^e Congrès des ingénieurs de chemins de fer.

Préparation des lingots métalliques par méthode Slavianoff. Bulletin de la Société technique, 1895, n° 6.

Soudure électrique, par CHATELIN. Électricité, 1893, nos 7, 8, 9, 10, 15, 16; 1894, nos 20, 21, 22; 1895, n° 21; 1896, nos 4, 5, 6.

Compte rendu, par TROITZKY. Revue électrotechnique, 1896, p. 173.

Industrie électrique, n° 88.

ne soit pas saturé par le carbone, que l'arc soit le plus long possible.

On a soin d'éviter l'échauffement excessif, car l'acier, le bronze ordinaire, etc., ne supportent pas une température trop élevée. C'est pour cela qu'on emploie le bronze phosphoré qui la supporte mieux. Il est indispensable, de recuire après avoir fini la soudure, sinon la pièce qui vient d'être réparée peut éclater par suite d'une contraction inégale des parties. Le recuit se fait sur le charbon de bois

La porosité du métal, après la fusion, disparaît par l'écrouissage qui rend le métal plus dense et fait sortir les scories.

Quand, sous l'action de l'arc, la partie environnant l'endroit à souder et le métal qu'on a ajouté sont fondus, on sature toute la masse par le carbone de manière à obtenir la fonte assez molle pour pouvoir la travailler mécaniquement. Le fer employé doit être le plus pur possible.

Prenons un exemple donné par Getz (*) : supposons qu'on ait à réparer la roue d'une locomotive dont le moyeu serait fendu, quelques rayons cassés et la jante fendue en plusieurs endroits. (fig. 1.)

On commence par le moyeu ; la fente est brûlée par l'arc jusqu'à 75 ou 100 mm. On la remplit de fer par couches successives comme nous l'avons vu plus haut. Immédiatement après l'écrouissage, on recuit l'endroit réparé jusqu'au rouge. Ensuite on passe aux fentes dans les rayons et dans la jante. Au moyen de l'arc, on brûle la pièce de manière que la fente traverse toute l'épaisseur

(*) *De l'application des méthodes de soudure électrique dans les ateliers de chemins de fer*, par GETZ. XV^e Congrès des ing. de ch. de fer.

de la pièce; ensuite la roue est mise horizontalement, l'ouverture de la fente tournée vers le haut. En bas et sur les côtés la fente est couverte par des plaques découpées dans de vieux creusets de graphite. On obtient donc une sorte de moule d'où le métal fondu ne peut plus sortir.

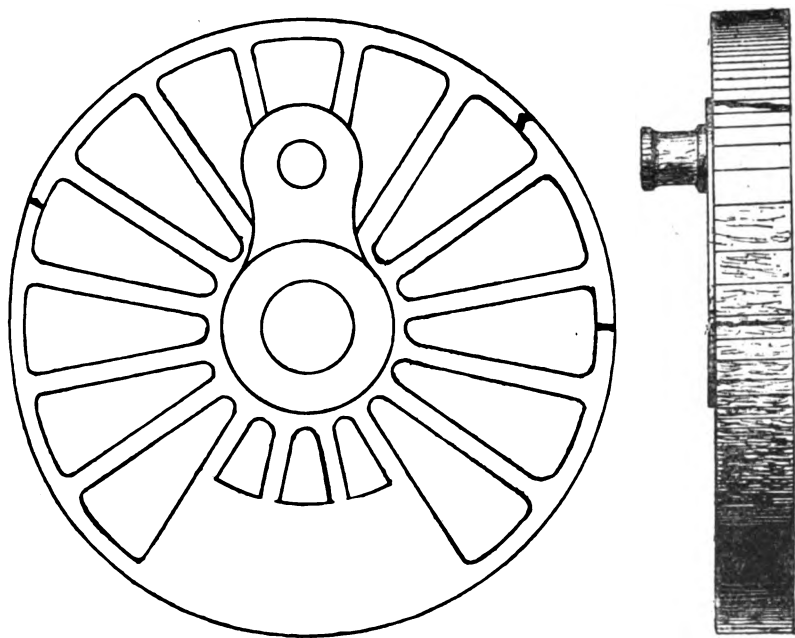


Fig. 1.

Pour faciliter l'écrouissage, ces plaques sont fixées de manière à pouvoir se détacher au moment nécessaire et découvrir la surface du métal qui doit être écroui.

La première couche est coulée directement sur la plaque de graphite et le fer dont est composée cette couche est saturé du carbone de la plaque. En plus, cette couche ne peut pas être bien forgée. On l'élimine en faisant de

nouveau fondre par l'arc la couche qui a été coulée la première et on la remplace par une couche coulée dans les meilleures conditions.

L'arc entre le charbon et le métal fait souvent fondre les parties entourant l'endroit qu'on soude, ce qui rend le travail difficile. Les essais qu'on a faits pour rendre l'échauffement progressif n'ont pas donné de bons résultats.

Comme source d'électricité, on emploie une dynamo avec une batterie d'accumulateurs pour éviter les irrégularités de marche par suite de la résistance très variable de l'arc. Cette dernière circonstance augmente notablement le prix de la première installation. Le courant peut atteindre jusqu'à 1 000 ampères.

Méthode de Slavianoff. — La méthode de Slavianoff se distingue de celle de Bénardos principalement par la matière de la tige servant à établir l'arc, qui, dans la méthode de Bénardos, est en charbon et dans celle de Slavianoff en métal.

La tige peut être du même métal que la pièce en travail, ou d'un autre métal ou alliage quelconque. On travaille ordinairement avec des tiges de 10 mm de diamètre et ce n'est que très rarement qu'on emploie des tiges de 7 mm de diamètre.

Quand, au contraire, on a à couler une grande quantité de métal, on emploie des tiges de 12 à 15 mm de diamètre.

La tige représente donc une des électrodes de l'arc; en fondant pendant la durée de l'opération elle abaisse plus ou moins la température de l'arc, suivant qu'elle fond avec une facilité plus ou moins grande. Cet abaissement est très utile et permet d'éviter le surchauffement du métal, ce qui arrive presque inévitablement avec les

électrodes en charbon. L'arc est réglé par un régulateur spécial qui permet d'éviter l'emploi, toujours très onéreux, des accumulateurs.

Le courant peut être pris directement à la dynamo. Cette dynamo doit être munie d'un induit incommutable et coûte nécessairement très cher, car on ne peut enrouler autour de l'induit qu'une seule couche de conducteurs, sans aucun isolant, entre lesquels on doit donc encore laisser un espace libre; le champ produit par les inducteurs doit être très intense et les dimensions de la dynamo augmentent considérablement. En tous cas, là où sont installées déjà des dynamos ordinaires servant à l'éclairage, il est plus économique de se servir des accumulateurs.

Le soudeur est suspendu sur la pièce en travail à un mécanisme élévateur qui permet de l'élever et de le transporter en avant ou en arrière au moyen d'un contre-poids. Avant de commencer le travail on fait les préparatifs suivants :

1° On travaille mécaniquement la pièce de manière que chaque point de la surface à réparer soit accessible à l'arc. Par exemple, si on a besoin de remplir un vide



Fig. 2.

(fig. 2), on lui donne la forme d'un segment (indiqué en pointillé). Dans le cas d'une fissure on l'élargit de manière qu'on puisse abaisser la tige jusqu'au fond. Si l'on doit conserver à une pièce cassée en deux morceaux sa longueur primitive, on la rabote jusqu'à la moitié de son épaisseur, l'autre moitié d'épaisseur est laissée

intacte et sert à conserver la longueur de la pièce constante et égale à la longueur primitive. Les deux parties de la pièce cassée sont mises dans la position qu'elles doivent occuper dans la pièce réparée et les parties rabotées sont soudées. La seconde moitié est à son tour rabotée et soudée après un chauffage préalable.

Chaque pièce doit être entourée d'un moule.

Comme matière des moules, on emploie, pour la fonte et les alliages de cuivre, les plaques de coke ou bien la poudre comprimée de charbon de cornue, agglomérée au moyen de la colle de menuisier ou de la mélasse; pour le fer et l'acier, le moule est en sable quartzéux.

2° Dans la fabrique de Perme, les plaques de coke sont travaillées au moyen d'une scie spéciale et ne sont placées qu'aux endroits où le moule doit toucher le métal fondu, le reste est rempli par de vieux moules pulvérisés. Si la surface est trop grande pour pouvoir être remplie d'un

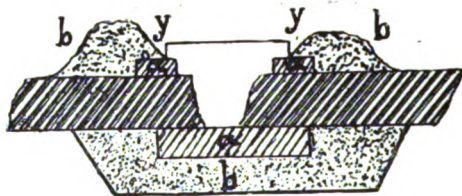


Fig. 3.

yy cloison.

b quartz.

a plaque de coke.

seul coup, on la divise par des cloisons (fig. 3) qu'on remplit l'une après l'autre. A 400 ampères, la surface qui doit être renouvelée ne peut être plus grande que 50 cm², et, si les parois sont métalliques, pas plus grande que 35 cm². Les cloisons sont constituées par plaques de

coke (fig 4) et les parties laissées pour le moment de côté sont remplies d'une masse de quartz. Quand le moule fait sur la pièce à réparer est prêt, on le sèche, puis on le chauffe doucement. Pour empêcher le coke de brûler pendant le chauffage, on ajoute du charbon de bois, puis,

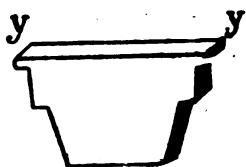


Fig. 4.

au-dessus, une couche de sable, on couvre le tout d'une plaque de fer et, pour produire la pression, on ajoute un certain poids. Quand la pièce à travailler est déjà chauffée, on ôte le couvercle et on retire le charbon et le sable par des soufflets.

Le moule se fait dans chaque cas d'une manière différente suivant l'endroit et le genre de défaut.

Par exemple, pour remplir des soufflures dans la fonte, il suffit de faire, dans une plaque de coke, un trou d'un diamètre un peu plus grand, et de la mettre sous les poids *g g*, en la couvrant d'un moule quartzéux (fig. 5)



Fig. 5.

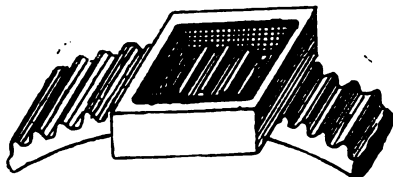


Fig. 6.

Pour faire les dents dans une roue dentée, on agit différemment (fig. 6).

Pour un travail soigné on emploie un moule de même

métal (fig. 7) que celui qu'on travaille; de cette manière, on évite des vides, dus au tassement ou au retrait du métal fondu (fig. 8) et la pièce a la forme (fig. 9). L'excès peut être éliminé.

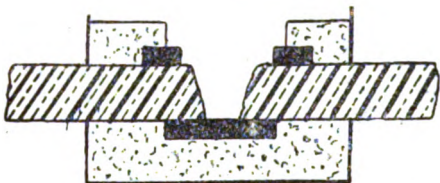


Fig. 7.



Fig. 8.

3^o Avant d'être mises en œuvre, toutes les pièces doivent être chauffées pour que les premières gouttes du métal ne se solidifient pas à leur contact.



Fig. 9.

Il est d'ailleurs indispensable de chauffer la pièce parce que le métal, en se solidifiant, peut amener des tensions dangereuses. Les métaux non malléables (fonte, bronze) peuvent donner des fissures.

On chauffe jusqu'au rouge cerise ou rouge sombre.

La fonte est chauffée moins que l'acier et le fer.

Comme exemple de fourneau de chauffage prenons celui des ateliers du chemin de fer d'Oural.

La chaufferie (fig. 10) est sous le niveau du plancher, à la hauteur duquel sont établis les rails. Le fourneau a deux parois fixes AA, et deux parois mobiles BB qui ne sont fermées au moyen de briques que quand la pièce y est placée. Les parois mobiles peuvent être rapprochées l'une de l'autre.

Les petites pièces en fonte et presque toutes les pièces en fer ou cuivre (excepté les plus grandes) sont chauffées

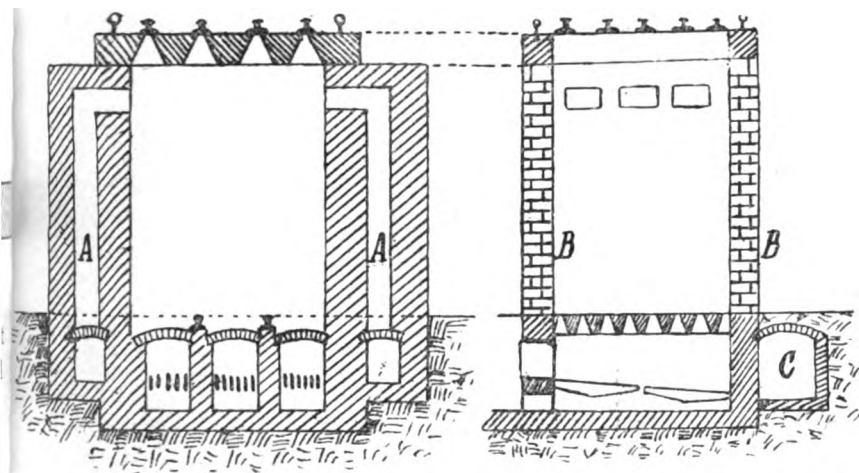


Fig. 10.

sur le fourneau (fig. 11) ou sur une plaque tournante (fig. 12) et la pièce qu'on chauffe est entourée de briques pour soutenir le combustible.

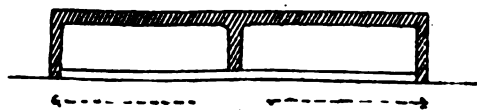


Fig. 11.



Fig. 12.

Pour les pièces longues on a un support spécial qui est composé d'une plaque en fonte ayant une entaille en coin, dans laquelle on met deux parties de la pièce cassée, qui sont pressées dans un étau si la pièce est assez grande.

Pendant qu'une des bornes de la dynamo est réunie avec la pièce en réparation, l'autre l'est avec la borne du régulateur automatique (fig. 13) qui n'est en somme qu'un

régulateur différentiel approprié à supporter le courant de grande intensité (800 à 1 000 A). On peut également réunir

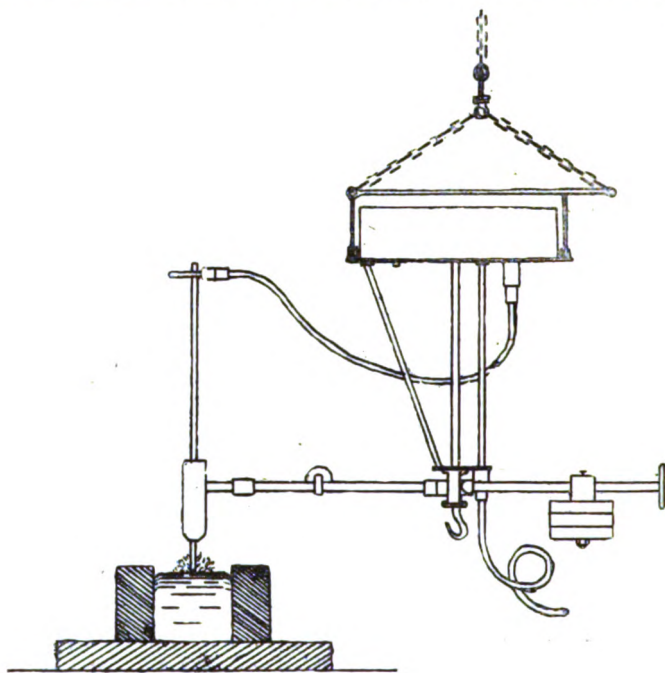


Fig. 13.

l'autre borne avec une tige métallique mise dans le trou à combler (fig. 14). Le trou qu'on veut combler est rempli de limaille métallique. Il se forme alors un arc entre la pièce et la tige du régulateur ou, dans le second cas, entre les deux tiges, celle du régulateur et celle qui est réunie avec la pièce. Les gouttes de métal liquide tombent dans le moule et le remplissent petit à petit.

Quand l'arc est établi entre la tige du régulateur et le métal liquide, on peut, si la quantité de métal liquide le permet, laisser la tige plonger dans le bain ou elle fond très

vite, ce qui diminue la durée du travail, abaisse la température du bain et diminue la quantité de métal brûlé.

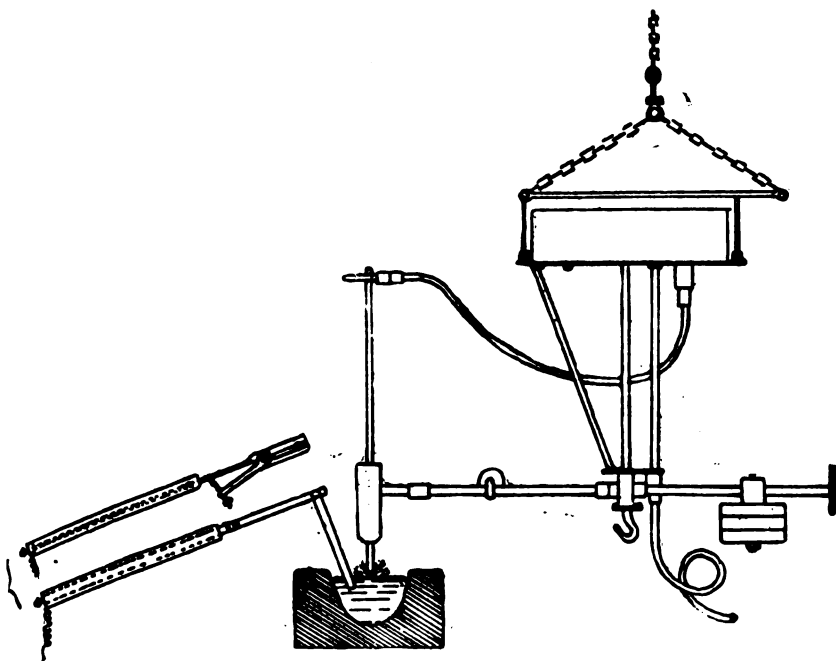


Fig. 14.

L'intensité du courant est réglée d'après les indications d'un ampèremètre et par des considérations pratiques. Ordinairement, on donne 8 A pour 1 mm². Quand l'intensité est trop grande, la tige est chauffée jusqu'au rouge, quand elle est trop faible on n'obtient pas un arc convenable : il tourne autour de la tige. La différence de potentiel minimum est de 50 V. La tige fond très vite; c'est ainsi que 400 gr. de tige de fonte de 10 mm. de diamètre, qui demandent donc 400 A. fondent en 1' 30". Le nombre de tours de la dynamo varie beaucoup au moment

de l'apparition de l'arc de sorte qu'il est préférable de n'établir aucun régulateur sur la machine et de la régler à la main au moyen d'une soupape ou par un obturateur sur le tuyau d'arrivée de vapeur.

Le sens du courant n'est pas indifférent.

Dans la plupart des cas, on réunit avec la borne positive de la dynamo, qui donne une température plus élevée, la partie qu'on veut chauffer plus que l'autre. Les pôles positif et négatif agissent encore chimiquement sur le métal liquide : ainsi, si la tige de fonte a le signe négatif, on a toujours la fonte trop dure, qui ne se prête pas au travail mécanique.

Le soudoir électrique est composé d'un solénoïde à gros enroulement s (fig. 15) avec noyau horizontal en fer N, d'une paire de ressorts R et R, d'un levier angulaire L o T et d'un cadre $p\ p$ avec des verres rouges et verts pour protéger les yeux.

L'enroulement à gros fil du solénoïde s est fait d'une seule tige de cuivre rouge de section carrée enroulée en spirale.

Un pareil enroulement se passe d'isolant et peut s'échauffer considérablement sans inconvénient. Pour rendre le régulateur différentiel, ce qui est indispensable dans le cas où l'on voudrait faire travailler ensemble deux régulateurs identiques, on a ajouté un autre solénoïde avec enroulement à fil fin. Le noyau N en forme de tube de fer est mis horizontalement, pour ne pas avoir besoin d'être équilibré. Il peut se mouvoir sur 4 roulettes r' . L'élasticité des ressorts peut être réglée au moyen de vis x .

Le mouvement du noyau est transmis au levier angulaire L o T au moyen d'une roulette r placée dans un compartiment fait au milieu du noyau. Le noyau en se déplaçant à droite ou à gauche, amène avec lui la roulette

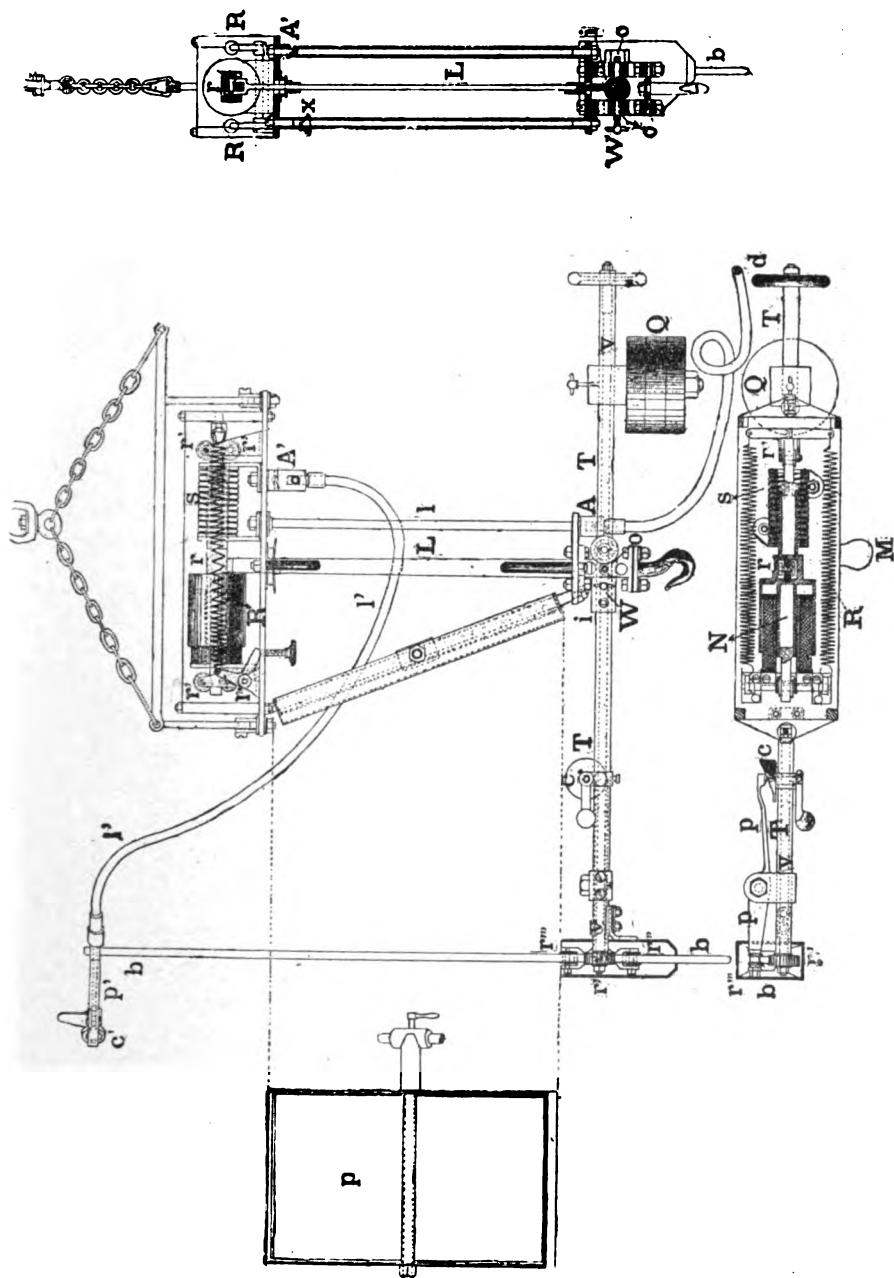


Fig. 15.

r et le levier angulaire L o T , dont l'axe passe par le point o , et s'incline d'un certain angle, en soulevant ou en abaissant la tige métallique c . Les deux tourillons o et o servant d'axe au levier sont fixés sur le même cadre en fer que les deux solénoïdes. La branche verticale du levier a en haut une fourchette pour soutenir la roulette r et en bas elle a un manchon par lequel passe un tube T en fer ou en acier. Dans ce tube passe une tige $v v$ munie d'un côté d'un petit volant d et de l'autre, d'une petite roue r' à dents en acier trempé. Entre cette roue à dents et deux petites roulettes $r''' r'''$ passe la tige b qui doit fondre et qui est retenue au moyen d'un ressort p et d'un coin circulaire c' . Un artifice semblable sert à réunir la tige b et le conducteur l' . Le poids Q sert à faire équilibre.

Si on veut travailler avec deux soudoirs, on doit encore réunir le borne A' du premier régulateur avec A du second.

Pour commencer l'ouvrage on met la tige b en place et on fait équilibre à l'aide du poids Q . Ensuite l'ouvrier transporte tout l'ensemble en tenant le manche M d'une main et le volant d de l'autre (*).

Une fois la tige b au-dessus de l'endroit qu'on veut réparer, l'ouvrier commence à tourner le volant d et établit contact entre la tige b et le métal; le courant est établi, le noyau est attiré par le solénoïde s et l'arc réunit la tige et le métal. Les gouttes de métal liquide tombent dans le moule. La tige fond et l'arc s'allonge tellement vite qu'il n'y aurait aucun moyen de l'empêcher de s'éteindre sans la régularisation automatique.

(*) *La soudure électrique par la méthode de Slavianoff*. Revue technique, 1891, n° 11.

A mesure que l'arc augmente, l'intensité du courant diminue, et le noyau sort petit à petit du solénoïde, et en tournant le levier L o T, abaisse la tige. De temps en temps il est nécessaire d'abaisser la tige à la main en tournant au moyen du volant *d* la roulette *r'*, ce qui peut se faire facilement et sans interruption de travail, car le régulateur corrige parfaitement toutes les irrégularités du mouvement. Le régulateur a un avantage spécial, il permet de se passer des accumulateurs et de prendre directement le courant aux bornes de la dynamo. Dans le cas où un courant de grande intensité traverse un circuit fermé sur une faible résistance, comme c'est toujours le cas ici, la tension diminue fortement et l'arc devrait s'interrompre immédiatement après son établissement et devrait continuer à s'interrompre encore chaque fois après la chute de chaque goutte du métal fondu. Le rôle du régulateur automatique est de diminuer la longueur de l'arc au moment nécessaire et l'empêcher de s'éteindre.

Si les dimensions de l'endroit à réparer sont grandes, on peut faire travailler deux soudeurs ensemble, mais la pratique a démontré qu'il est plus commode et plus économique de n'en employer qu'un seul.

Si la quantité de métal fondu est considérable, on peut de temps en temps jeter dans le bain de petits morceaux de métal, ce qui raccourcit la durée du travail et abaisse la température du bain. Si le travail est exécuté convenablement on obtient l'union complète du métal coulé avec celui de la pièce qu'on avait à réparer, car le métal coulé et la surface de la pièce métallique s'unissent entre eux à l'état liquide, ce qui n'arrive pas dans la soudure ordinaire.

Ordinairement on a besoin de deux hommes pour le travail : le fondeur s'occupe du soudeur, son aide change les

tiges pendant l'opération, ajoute dans le bain les morceaux du métal, si la température du bain est trop haute, ou certains agents chimiques s'il le faut. En tout cas, les ouvriers ne peuvent pas continuer leur travail pendant trop longtemps à cause de l'action de l'arc sur l'épiderme et les yeux, quoique ces derniers soient protégés par des verres colorés. En général la durée de la coulée n'est que de quelques minutes.

Si le moule est métallique, on emploie des tiges composées de :

Fonte grise . . .	100 parties
Ferro-silicium . .	12,5 parties (*)

Si le moule n'est pas métallique on peut employer n'importe quelle fonte.

La tige doit être réunie avec le pôle positif, autrement on aurait de la fonte blanche et dure.

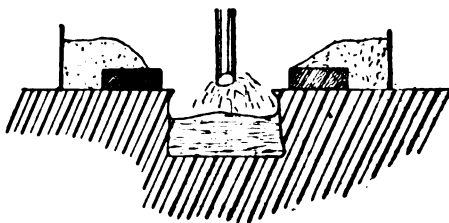


Fig. 16.

Quand on a affaire à une fonte qui a été plusieurs fois chauffée à une haute température, on doit ajouter du ferromanganèse, autrement le métal du bain s'unit mal au métal de la pièce, ce qu'on peut reconnaître facilement par la

(*) Ces proportions, comme celles qui suivent, sont adoptées à l'usine de Perme.

forme du ménisque : si l'opération va bien, il a la forme de la fig. 16, dans le cas contraire il se présente comme dans la fig. 17 et on doit ajouter du ferro-manganèse.

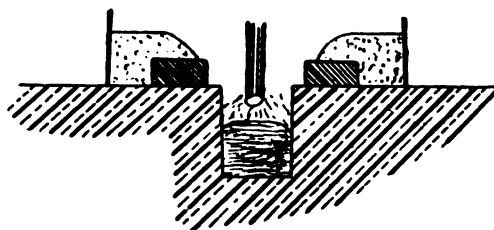


Fig. 17.

La température du bain ne doit être ni trop haute ni trop basse et la profondeur du bain ne doit pas être de plus de 30 ou 50 millimètres.

Il faut que le bain se refroidisse de bas en haut, autrement on aurait des soufflures.

Pour obtenir un bon métal, on refond, à l'aide du soudeur, à plusieurs reprises pendant l'opération, la croûte de métal solide qui se forme au-dessus du bain, jusqu'à ce que la profondeur soit moins de 30 mm, ce qu'on reconnaît au moyen d'une tige de fonte qu'on abaisse dans le bain. Pour prolonger la durée de refroidissement à la fin de l'opération, on met au-dessus du charbon de bois en poudre. Il ne reste alors qu'à éliminer sur le tour, l'excès du métal. Si les parois du bain sont en métal (par exemple dans le cas de grandes soufflures), la fonte peut être trempée dans les endroits où le métal liquide touche la paroi solide.

Dans ce cas on enrichit la fonte en carbone : on ôte la tige de métal, on la remplace par une tige de charbon et on rétablit l'arc. La fonte qu'on obtient est d'autant plus douce et riche en graphite que l'opération a duré plus longtemps. Cette opération ne réussit que quand le charbon est réuni au pôle positif.

FER ET ACIER.

Pour le fer on emploie une tige en fer, pour l'acier une tige en acier.

Dans ce cas c'est la tige qui est réunie au pôle négatif, car c'est la pièce qui doit être chauffée plus fortement. Dans le cas du fer et de l'acier, la surface du bain doit être couverte d'une couche de 10 mm de scories pour empêcher le métal de s'oxyder. Pour cela on ajoute de temps en temps du verre pilé. Si le bain est bien chaud et sa profondeur de 30 mm, on plonge dans le bain le bout d'une tige en fer ou en acier qui se fond et refroidit le bain. Si le bain est plus profond, jusqu'à 60 mm, pour refroidir on arrose la surface inférieure de la pièce avec de l'eau ou bien on fait couler l'eau dans un tuyau sous le moule (fig. 18).

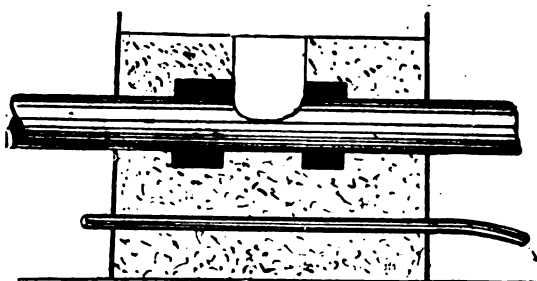


Fig. 18.

Comme agent chimique, on emploie le ferro-manganèse ($Mn = 80 \%$) qui réduit les oxydes de fer. On en ajoute jusqu'à 5 % dans le cas du fer et 1 % dans le cas de l'acier ; un peu plus au commencement et à la fin que pendant l'opération.

Parfois pour rendre l'opération plus tranquille et em-

pêcher le bouillonnement on ajoute une petite quantité de ferro-aluminium. Dans le cas du fer ou de l'acier, il faut refondre à l'arc, la croûte supérieure du métal, pour que le bain se refroidisse de bas en haut. Dans ce cas, les gaz qui se forment pendant la solidification du métal peuvent s'en aller librement. Dans le cas d'un bain profond il faut répéter cette opération plusieurs fois jusqu'à ce que la profondeur soit de 10 mm. Il est utile de recuire jusqu'au rouge clair les pièces fondues.

CUIVRE.

Pour le cuivre rouge, la tige a le signe négatif. On ajoute ordinairement dans le bain une autre tige de cuivre qui fond vite sans s'oxyder; la première tige brûle très vite et donne une quantité considérable (15 %) d'oxydes. Avec le cuivre on a beaucoup de scories qui ne fondent que difficilement.

Pour les éliminer, on ajoute l'épurateur phosphorique. Si le bain est profond (15 mm et plus), on brûle encore la surface, qui se refroidit comme tantôt, pour éviter les vides de retrait et les soufflures. Quand la pièce s'est refroidie jusqu'au rouge sombre, il est utile de l'arroser avec de l'eau, le métal devient alors plus tendre.

BRONZE.

La tige a le signe positif. Pour les tiges on emploie l'alliage

Cu 89 %

Sn 11 %.

Cet alliage ne contient ni zinc qui aurait brûlé complètement, ni plomb qui donnerait des vapeurs dange-

reuses. Si on veut que le métal fondu contienne du zinc ou du plomb on les ajoute après l'épuration par phosphore. Si on les ajoute avant, la combinaison du zinc avec phosphore rend les qualités du métal plus mauvaises.

Si la tige contient du zinc, on peut éliminer les oxydes par l'aluminium ($\frac{1}{2}$ %); on brûle la croûte et on trempe comme pour le cuivre.

LAITON.

Dans ce cas la tige a le signe positif et, comme métal des tiges, on emploie le bronze. Immédiatement après avoir fondu la pièce, on ajoute le zinc et l'aluminium en proportions suivantes par kg tige de bronze :

0,28 kg zinc

0,14 kg aluminium.

On ajoute dans le bain des tiges de bronze, l'opération va très vite et on brûle comme à l'ordinaire.

APPLICATION A LA FABRICATION DES LINGOTS D'ACIER.

Un lingot coulé a ordinairement la forme (fig. 19), où se montrent des vides remplis des gaz ou des scories qui n'ont pas eu le temps de sortir avant la formation de la croûte du métal solidifié et, en *a*, des vides de retrait provenant de la contraction du métal pendant le refroidissement. La partie supérieure, environ $\frac{1}{3}$ (de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$) du volume total, doit donc être rejetée et cette partie est d'autant plus grande que la température à laquelle l'acier est porté est plus haute. Ces défauts peuvent être éliminés par deux méthodes : 1^o chimique et 2^o mécanique.

Dans la méthode chimique on ajoute des agents qui donnent avec les gaz des produits solides.

Ces agents sont pour l'acier et le fer :

ferro-silicium

ou alliage d'aluminium et fer (ferro-aluminium)

ou aluminium seul.

Les gaz, composés en majeure partie d'oxyde de carbone, se combinent avec les agents en donnant des composés solides (oxyde d'alumine ou oxyde de silicium) et le carbone se dissout dans la masse du métal. De cette manière on évite les vides et soufflures. Mais d'un autre côté la qualité du métal s'altère, car les oxydes insolubles n'ont pas souvent le temps de remonter à la surface, et, de plus, les lingots qui ont été traités par la méthode

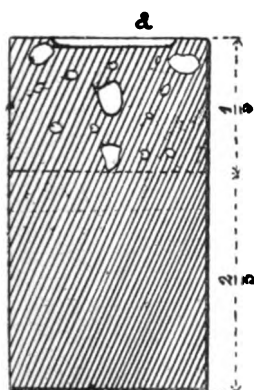


Fig. 19.

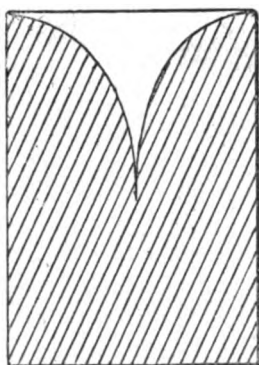


Fig. 20.

chimique ont toujours un cône de tassement bien plus long (fig. 20), de sorte qu'il faudra rejeter la moitié du lingot. Parfois, ce cône se termine par un vide conique d'un diamètre si faible qu'on ne peut le remarquer pendant la séparation de la partie mauvaise du lingot, et ce

n'est qu'en trempant la pièce forgée qu'on voit le défaut apparaissant sous une forme de fente à la surface extérieure.

La méthode mécanique consiste à faire subir au métal, une pression considérable, immédiatement après qu'il est coulé, dans un récipient à parois solides. L'acier n'a plus de vides, car les gaz s'échappent par la croûte solidifiée sous l'influence de la pression. Mais les cônes de tassement ne sont pas éliminés, ils ont changé seulement de

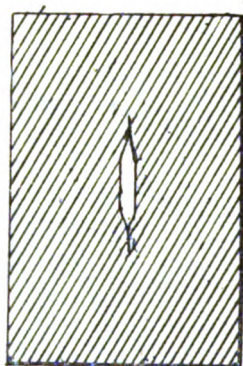


Fig. 21.

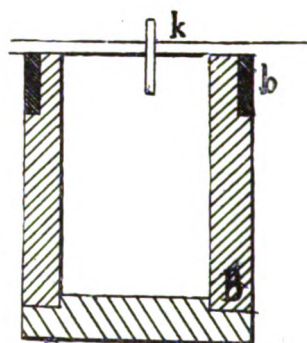


Fig. 22.

position, car ils occupent maintenant le milieu de la pièce et ils ont la forme d'un cigare (fig. 21). La partie qu'on peut utiliser occupe moins de la moitié de la pièce totale. La seule méthode réellement pratique consiste à chauffer la croûte supérieure à l'aide de l'arc.

Le lingot a le signe négatif et la tige de charbon de 70 mm de diamètre, le signe positif.

Une lingotière en fonte B (fig. 22) à parois épaisses est entourée à la partie supérieure d'un cylindre métallique *b*, recouvert à l'intérieur de briques ou d'une masse réfractaire pour empêcher l'acier fondu par l'arc de se souder

aux parois. La lingotière est recouverte d'une plaque de tôle pour diminuer la perte par rayonnement et laisser passer le charbon. Le refroidissement va de bas en haut et on continue à chauffer jusqu'à ce que l'acier soit solidifié jusqu'en haut. La hauteur de la partie de lingot inutilisable ne représente que 8 à 15 % de la hauteur totale (fig. 23).

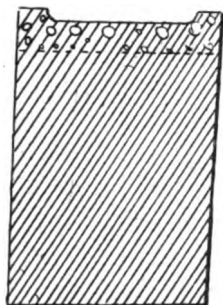


Fig. 23.

Le courant employé est de 800 A et 100 à 110 V, la longueur de l'arc est 150 à 200 mm. L'opération dure 3 heures avec des lingots de 13 tonnes. L'expérience a démontré qu'on diminue de fr. 19,05 le prix d'une tonne d'acier Martin ordinaire dont le prix est de 194 francs, en le traitant par la méthode ci-dessus. De même le prix d'une tonne d'acier de creuset traité par cette méthode est de fr. 190,05 moins élevé que l'acier de creuset ordinaire, dont le prix est de fr. 865,05.

Un des principaux avantages de cette méthode est que l'usine peut préparer, en les traitant électriquement, des lingots 1 $\frac{1}{2}$ fois plus lourds que ne le permettent les méthodes ordinairement employées. Par exemple, si les moyens techniques de l'usine ne permettent pas de préparer les lingots plus lourds que 50 tonnes, en rejetant les parties défectueuses, on n'a que 25 à 35 tonnes d'acier utilisable.

L'application du procédé Slavianoff à la fabrication des lingots d'acier permet d'obtenir sans rien changer dans l'outillage de l'usine les pièces de 45 tonnes. Tous les essais faits ont donné de bons résultats et tout permet de supposer que cette méthode a un grand avenir.

COMPARAISON DES MÉTHODES SLAVIANOFF ET BÉNARDOS.

En comparant les deux méthodes, celle de Bénardos et celle de Slavianoff, on voit que la méthode de Slavianoff a plusieurs avantages sur celle de Bénardos.

1. Dans la méthode de Bénardos la température de l'arc est toujours trop haute, parce qu'une des électrodes est en charbon. Cette propriété de la méthode rend assez difficile son application aux pièces de fonte, la fonte devenant souvent, sous l'influence de l'arc, de la fonte blanche, dure et difficile à travailler.

De même, les alliages de cuivre ne peuvent être traités que difficilement par cette méthode (excepté le bronze phosphoré), car ils s'oxydent facilement; l'application de la méthode à l'acier ne donne pas, non plus, toujours les résultats désirables.

Voilà l'opinion de Getz (*), basées sur les expériences obtenues dans les ateliers de Roslawle, où la méthode de Bénardos est appliquée en grand et a donné en général des résultats satisfaisants.

« Dans tous les essais faits pour déterminer la charge de rupture des éprouvettes en acier soudé, la surface saine représentait $\frac{1}{4}$, au plus $\frac{1}{3}$, de la surface totale de section, le reste était occupé par une soufflure. Cette mauvaise qualité de soudure s'explique par ce fait que

(*) *XV^e Congrès des Ingénieurs de chemins de fer*, p. 107.

presque tous les échantillons d'acier pour outils ne peuvent pas être trop surchauffés, tandis qu'ici le surchauffement est excessif et de faible étendue, ce qui ne peut avoir qu'une mauvaise influence sur la qualité de l'ouvrage. »

« Les épreuves faites avec le cuivre rouge étaient les plus mauvaises, toutes sans exception avaient des soufflures, de même le laiton a donné la soudure peu solide (*). » Au contraire, dans les travaux par la méthode de Slavianoff, la température de l'arc est toujours bien plus basse que dans le cas où une des électrodes est en charbon, car le métal de la tige fond sans interruption et la plus grande quantité de chaleur n'est pas dépensée à échauffer le métal, mais à fondre la tige; ainsi, tous les défauts de la méthode de Bénardos, provenant d'une trop haute température, n'existent pas dans l'autre méthode.

2. La soudure du métal, dans la méthode de Bénardos, se fait par couches qui sont nécessairement séparées par de minces couches d'oxydes, ce qui nuit évidemment à la solidité. Ainsi, dans les ateliers des chemins de fer de Voronège, on n'exécute la soudure par la méthode de Bénardos que si la pièce a des dimensions suffisantes pour avoir une résistance au moins double de celle qu'elle devrait avoir si elle n'était pas soudée (**).

(*) *XV^e Congrès des Ingénieurs de chemins de fer*, Compte rendu par l'ingénieur Petrachevsky, p. 120.

(**) *Id.* *Id.*

Il faut remarquer pourtant que, dans les usines de Véronège, en général, on ne paraît pas enthousiasmé pour les deux méthodes de soudage électrique. Les expériences faites sur les pièces planes ont montré que leur résistance est peu différente de celle des pièces non soudées, mais les résultats obtenus dans les essais faits sur les pièces rondes ont montré une diminution de résistance bien sensible, qui résulte de ce qu'elles sont plus difficiles à forger.

Dans la soudure faite par la méthode de Slavianoff, on a un bain de métal liquide où tous les oxydes peuvent remonter à la surface.

L'homogénéité du métal après la soudure par cette méthode est démontrée par l'expérience suivante (*):

On a pris deux tiges d'acier ayant une section de 12 cm². Leurs deux bouts étaient soudés. Ensuite, sans faire l'écrouissage de la pièce, on l'a coupée en deux parties égales par un plan passant par l'axe. La surface de coupe d'une des parties a été polie et, même après un examen minutieux, il n'y avait pas moyen de distinguer une différence quelconque dans la structure du métal sur toute la longueur.

Cette homogénéité du métal fordu assure la résistance des pièces réparées, qui est au moins égale à celle des parties saines, ce qui a été vérifié plusieurs fois par essais de rupture fait au laboratoire de l'usine de Perme (**).

3. La longueur de l'arc, dans les travaux par la méthode de Bénardos, est réglée à la main, l'intensité du courant subit donc des variations considérables, ce qui rend indispensable l'emploi des accumulateurs pour ce genre de travaux; car, si on prenait le courant directement à la dynamo, les chocs résultant de la variation de quantité de travail demandé à la dynamo la mettrait bientôt en mauvais état, ainsi que le moteur. Bien que les dynamos à induit incombustible de Slavianoff soient elles-mêmes très chères, le prix d'installation primitive comme le prix d'exploitation, sont considérablement diminués.

Pourtant, si on a déjà la dynamo servant le soir à l'éclairage, l'emploi des accumulateurs est plus écono-

(*) NIKOLAEFF. *Soudure électrique des métaux par la méthode de Slavianoff*, ingénieur, t. XX, p. 210. — 1896, Kieff.

(**) CHOUDIAKOFF. *Coulée électrique des métaux par la méthode Slavianoff*.

mique que l'installation d'une nouvelle dynamo. En somme, les deux méthodes sont très chères ; à Roslawle, par exemple, où est appliquée la méthode de Bénardos, une heure de travail revient à 8 francs, mais ces dépenses sont largement rétribuées par les services rendus.

Un autre défaut du réglage à la main, c'est l'impossibilité d'exécuter un travail de manière à être sûr des résultats qu'on obtiendra.

La différence entre les résultats obtenus s'explique par la difficulté de soutenir une température déterminée, par l'impossibilité de conserver constante la distance entre le soudoir et la pièce, et de déterminer exactement la durée de l'opération. Avec la meilleure volonté de faire un bon travail, même de la part d'un ouvrier expérimenté, on obtient souvent des résultats négatifs (*). La longueur de l'arc doit être la plus grande possible, mais dans le cas du réglage à la main on ne réussit pas à obtenir ce résultat sans une grande habitude. Tous ces défauts sont éliminés par la régularisation automatique : ici le rôle de l'ouvrier est presque nul.

En réglant l'arc à la main, on est obligé de donner au charbon le signe négatif, autrement on a difficile d'obtenir un bon arc. En le réglant automatiquement, on peut donner à la tige de métal ou de charbon le signe voulu, qu'on peut varier suivant le métal qu'on coule, l'effet chimique ou thermique qu'on veut obtenir. L'arc est toujours sans interruption quelles que soient les conditions de travail.

4. Il arrive souvent que, dans les travaux par la méthode de Bénardos, on brûle la partie voisine de celle qu'on

(*) *XV^e Congrès des ingénieurs de chemin de fer*, p. 121.

« Dans l'application de la méthode de Bénardos, le degré de l'expérience de l'ouvrier joue le plus grand rôle ».

travaille et qu'on gâte de cette manière le travail. Cela arrive souvent, par l'apparition sur le charbon de la flamme qui dévie de côté et entraîne l'arc avec elle.

Dans le cas d'une tige métallique, l'arc ne dévie jamais et suit strictement le chemin des gouttes tombant dans le bain de métal liquide.

En général, une grande quantité de travail est perdue, dans le cas d'électrode en charbon, à chauffer et évaporer même, ce qui diminue considérablement le coefficient de travail utile; tandis que dans le cas d'une électrode en métal, ce coefficient est très grand, car tout le travail est dépensé à échauffer et fondre une des électrodes métalliques. Ensuite, l'arc échauffe toujours l'endroit même où doit tomber la goutte de métal liquide, et le travail continue dans ces conditions jusqu'à la fin, quoiqu'on promène tout le temps l'électrode au-dessus de la surface du métal liquide. Grâce à cette propriété, on obtient l'union parfaite des gouttes de métal avec la surface du métal fondu, ce qui fait qu'on a toujours un bain de métal bien uniforme avec lequel on peut faire toutes les opérations métallurgiques, en introduisant dans le bain des désoxydants ou des métaux, aluminium, plomb, etc., pour changer la composition de l'alliage.

5. On a difficile d'appliquer la méthode de Bénardos aux pièces de trop grandes dimensions, car leur forgeage est trop difficile. Ainsi, dans les ateliers de chemin de fer de Véronège on préfère souvent les couler par les moyens ordinaires.

Au contraire, le forgeage n'est point obligatoire dans le cas d'application de la méthode de Slavianoff et les pièces de toutes dimensions peuvent être également bien traitées.

En somme, on peut dire que pour tous les travaux avec des tôles pour la fabrication des réservoirs, tubes et réparations des défauts extérieurs (soufflures, etc.), à la

condition expresse que ces défauts soient dans les endroits qui ne sont pas soumis aux tensions considérables (*), il est commode d'appliquer la méthode de Bénardos. Mais dans les pièces plus grandes et plus exposées aux efforts, ou quand on a besoin d'une grande quantité de métal, ou dans les travaux en fonte ou alliages de cuivre, dans le cas où on veut changer la composition chimique d'une partie de la pièce, ou de la pièce entière, ou si on veut mettre une couche d'un métal sur un autre, dans les cas de réparations de pièces chères ou difficilement remplaçables, c'est à dire où on doit être sûr du résultat, la méthode Slavianoff semble plus rationnelle et, dans des mains expérimentées, elle donnera les meilleurs résultats. La soudure des fils de fer, câbles, lames de fer, peut être exécutée le mieux par la méthode de Thompson. Cette dernière méthode n'est pas applicable à la soudure des tôles et est d'application relativement difficile.

En plus, elle demande un générateur de grande puissance et oblige à construire des appareils spéciaux pour chaque cas, car l'élévation de température est limitée par des espaces en contact. Le prix d'installation de cette méthode est très élevé.

(*) L'exemple suivant démontre bien jusqu'à quel point les résultats d'application de la méthode Bénardos dépendent de l'expérience des ouvriers et les difficultés qu'on a à obtenir un travail dont le résultat est sûr. On lit dans le compte rendu de Petrachevsky (*XV^e Congrès des ingénieurs de chemins de fer*, p. 120) : « Toutes les expériences de soudure des tôles de chaudières, des cylindres en fonte des locomotives ont donné des résultats négatifs, tandis que l'usine de Kolomna essaie des réservoirs pour l'éclairage au gaz des wagons de chemins fer, préparés par la méthode de Bénardos sous des pressions de 20 atmosphères ».

CONDITIONS HYGIÉNIQUES DE TRAVAIL.

L'arc électrique ayant parfois une longueur de plusieurs centimètres, produit une action nuisible sur les yeux et l'épiderme. Les ouvriers sont protégés, non seulement par des verres colorés, encadrés de bois et entourés d'une feuille de tôle, mais encore par des lunettes. Pour diminuer l'influence des rayons émis par l'arc sur l'épiderme, le visage est couvert par un masque; de plus, les ouvriers portent des gants et tablier en cuir. La lumière en tombant sur une partie nue du corps enlève la peau avec une faible douleur, qu'on diminue par des lavements à l'acide borique; la respiration des vapeurs de fer produit une douleur à la poitrine.

Les conditions hygiéniques de travail sont tellement mauvaises que, dans certaines usines, par exemple dans les ateliers de Roslawle, on a été obligé de distribuer le travail de manière que chaque ouvrier ne travaille, dans le voisinage immédiat de l'arc, qu'une demi-journée sur trois.

On a, pour les travaux avec l'arc, 6 ouvriers dont on fait trois brigades de 2 ouvriers, travaillant chacune un jour; un ouvrier se sert du soudoir, l'autre du marteau pendant une demi journée, ensuite ils changent leur rôle, de manière que chaque ouvrier ne subit l'influence de l'arc qu'une demi journée sur trois. Celui qui travaille avec le marteau est séparé de l'arc par une paroi complètement opaque. Les quatre ouvriers qui ne sont pas occupés font les réparations aux machines, etc.

On ne travaille que pendant la journée, car, le soir, même si l'atelier est éclairé à l'électricité, les yeux supportent difficilement l'influence de deux éclairages trop différents et les ophtalmies sont plus à craindre.

L'atelier électrique doit donc, en général, être bien éclairé et aéré.

Voici quelques résultats obtenus par l'application des deux méthodes et quelques devis démontrant les services qu'ils peuvent rendre dans différentes usines.

On a dans toutes les usines de chemin de fer une grande quantité de roues avec des défauts, qui les font retirer de la circulation. Leur réparation, par les méthodes ordinaires, est difficile, onéreuse et souvent même tout-à-fait impossible. Leur réparation, par une des deux méthodes précédentes, est facile et économique. Ainsi à un train de roues de locomotive coûtant 2 000 à 2 300 francs, on peut faire souder en trois jours deux fentes du moyeu, quelques rayons et 10 à 15 fentes dans la jante. Il est presque impossible de les réparer par les méthodes métallurgiques ordinaires. Cette réparation par la méthode de Bénardos, a coûté aux usines de Roslawle, 284 frs. Les mêmes réparations exécutées à Roslawle ont permis de rendre à la pratique une grande quantité de roues tout-à-fait hors d'usage et qu'on se proposait déjà de vendre comme ferraille.

Aux usines de Perme on a exécuté, par la méthode de Slavianoff, les travaux suivants : (*)

1. *Remplissage des vides par coulée à l'arc dans les pièces en fonte, cuivre, etc.* — EXEMPLES: a. Coulée de la fonte dans une portée du ressort de piston d'une machine de bateau : diam. 1 003 mm

b. Coulée de la fonte dans une fissure complète dans une boîte à bourrage et dans les brides du couvercle de la boîte de distribution.

(*) Le bénéfice est calculé comme étant égal au prix de la pièce en bon état, moins son prix comme ferraille, moins le prix de réparation.

2. *Coulée dans les soufflures de pièces d'acier ou dans des trous inutiles faits par erreur dans n'importe quelle pièce.* — EXEMPLE: a. Coulée par l'acier dans une grande soufflure d'un moyeu de la roue d'un bateau à vapeur

b. Coulée dans la fente d'un couvercle de cylindre d'une machine de bateau à vapeur, type Corliss.

3. *Soudure de deux parties de la pièce cassée en conservant les dimensions primitives.* — EXEMPLE. Soudure des deux parties du bâti d'une cisaille ayant une fente de 1041 mm de longueur.

4. *Réparation des parties usées au moyen d'une couche de métal coulée sur la surface de frottement.* — EXEMPLE. Coulée dans les bords usés et cassés de guides de cisaille.

5. *Soudure des parties cassées ou insuffisantes à cause de la mauvaise coulée ou du mauvais travail mécanique.* — EXEMPLE. Coulée d'une partie de bride d'une machine à triple expansion d'un bateau.

	Poids en kilog.	Prix de la pièce en bon état	Prix de la pièce comme déchets	Main d'œuvre	Matériel	Courant	Bénéfice
		frs.	frs.	frs.	frs.	frs.	frs.
1. { a.	98	124	5,50		24,70		93,80
b.	376	166,40	19,50		8,47		138,43
2. { a.	425,70	103	13,65	3,60	5,25	4,03	76,47
b.	524	843	29	12,25	8,20	5	788,55
3	2 604	620	102	72,70	39,90	32,70	372,70
4.	525						390
5.	1 971	1 566	76	42	15	2	1 431

6. *Coulée d'une couche de métal sur les surfaces frottantes pour diminuer le coefficient de frottement.* — EXEMPLE. On coule du bronze sur la surface de frottement des guides en acier de la machine à vapeur. Si on avait voulu poser les mêmes plaques de bronze avec des vis, le travail et le matériel auraient coûté 39 frs.; le même travail exécuté à l'aide de l'arc a coûté 20 frs. et le bronze était fixé bien plus solidement que dans le premier cas.

7. *Transformation de la fonte blanche en fonte grise.* — EXEMPLE. Pendant la coulée des soufflures dans le cylindre d'une machine à vapeur par la méthode ordinaire, c'est à dire par la fonte liquide, une partie des parois était fondue et la fonte était devenue blanche et dure. La fonte altérée a été facilement ramenée à l'état gris par une seconde fusion à l'arc et le travail pouvait être facilement exécuté.

Dans le travail du professeur Choudiakoff, mentionné plus haut, on peut trouver encore d'autres devis concernant l'application de la méthode de Slavianoff et dans le compte rendu du *XV^e Congrès des ingénieurs* ceux concernant la méthode de Bénardos.

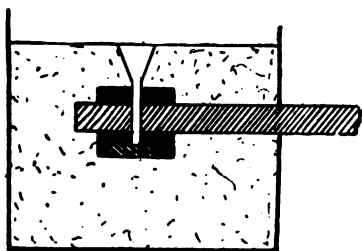


Fig. 24.



Fig. 25.

Coulée dans un trou (a) de secteur d'un canon

Les figures 24 à 30 représentent les exemples de réparations exécutées aux usines de Perme et la manière de préparer la pièce.

La figure 31 représente un essai de coulée d'une pièce de métaux différents.

Sur une plaque d'acier on a coulé une couche de fonte de 25 mm d'épaisseur; ensuite une couche de cuivre et une couche de laiton de même épaisseur. Cette plaque a été soudée par du bronze ordinaire avec une autre plaque préparée de la même façon. La pièce coupée, on pouvait

constater adhérence des divers métaux et l'absence de tout défaut de coulage.

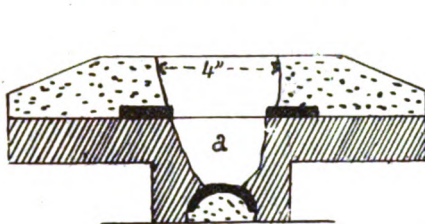


Fig. 26.

Coulée dans un trou de plateau d'un tour.

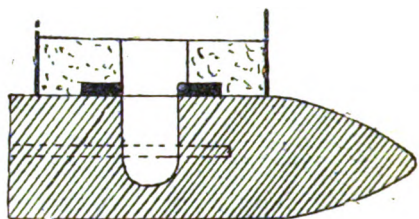


Fig. 27.

Coulée dans un trou foré dans une pièce destinée aux essais de rupture

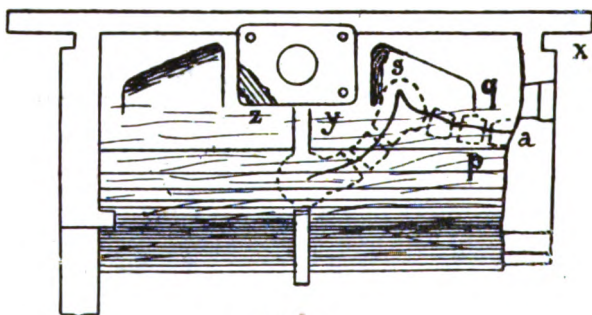


Fig. 28.

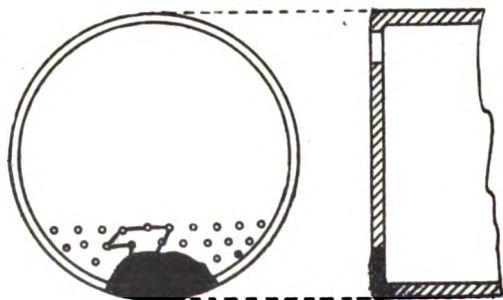


Fig. 29.

Tous les travaux précédents ont non seulement la qualité de rendre la réparation d'une pièce plus facile, plus économique et plus sûre au point de vue de la

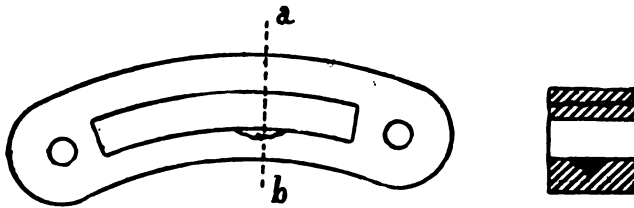


Fig. 30.

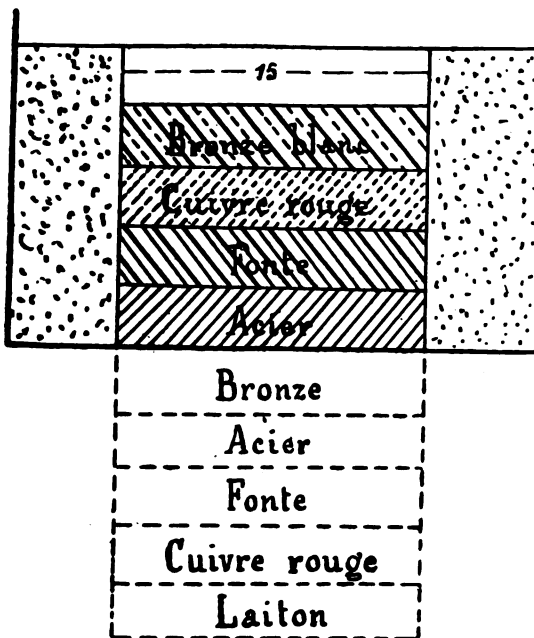


Fig. 31.

résistance, mais encore plus rapide, et le service rendu de ce côté peut être énorme, car souvent la dépense d'une

dizaine de francs permet d'éviter la dépense de plusieurs centaines de francs en diminuant jusqu'au minimum la

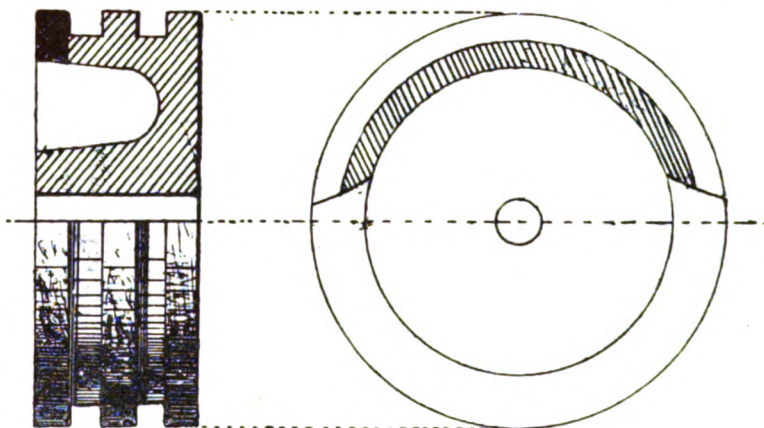


Fig. 32.

Réparation d'un piston en fonte d'une machine de bateau à vapeur. durée d'interruption de travail par suite d'un accident de travail (*).

DESCRIPTION DE QUELQUES INSTALLATIONS (**).

Usine de Perme. — Dans l'atelier est installée une dynamo mue par une machine à vapeur à un seul cylindre,

(*) L'exemple suivant le démontre bien. Dans une usine mécanique à Perme, pendant le chargement d'une petite machine à vapeur on a cassé le bâti. On a été obligé de renvoyer la machine à l'usine. Le lendemain elle était prête avec bâti réparé, et consolidée par des nervures soudées. Elle est arrivée à destination avec un seul jour de retard.

De même, la réparation (fig. 32) a été exécutée dans un temps très court. On a reçu la pièce le soir et le jour suivant, à 6 heures du matin, la pièce réparée était déjà sur le bateau.

(**) *Soudure électrique par les méthodes de Bénardos et Slavianoff.* L. GERKEN, ingénieur, 1896.

à l'aide d'une transmission par poulie et courroie. La dynamo fait 350 tours et fournit 800 A sous 110 V. Cette dernière tension n'est employée que pour la préparation des lingots d'acier; pour le coulage, on travaille à 60 V (200 tours) et pour l'éclairage, 75 V (275 tours).

Le nombre de tours de la machine à vapeur varie de 20 à 35 tours par minute. La dynamo est excitée en dérivation; l'induit, type Gramme, est composé de tiges de cuivre, 10×12 mm, isolées en bas par de l'asbeste et séparées l'une de l'autre par un espace libre. Le collecteur est à 8 balais.

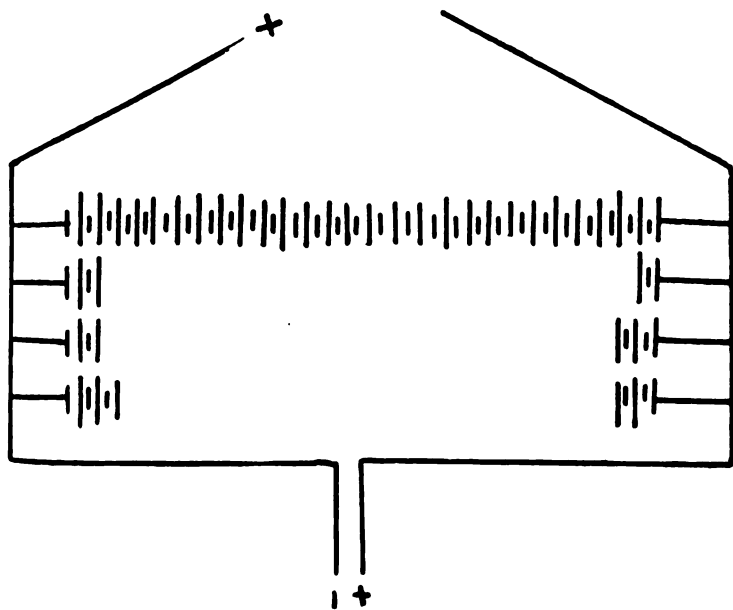


Fig. 33.

Le tableau de distribution est du type à armoire.

Dans chacun des circuits (on en a 8), on a un interrupteur, un commutateur, un ampèremètre et un coupe-circuit.

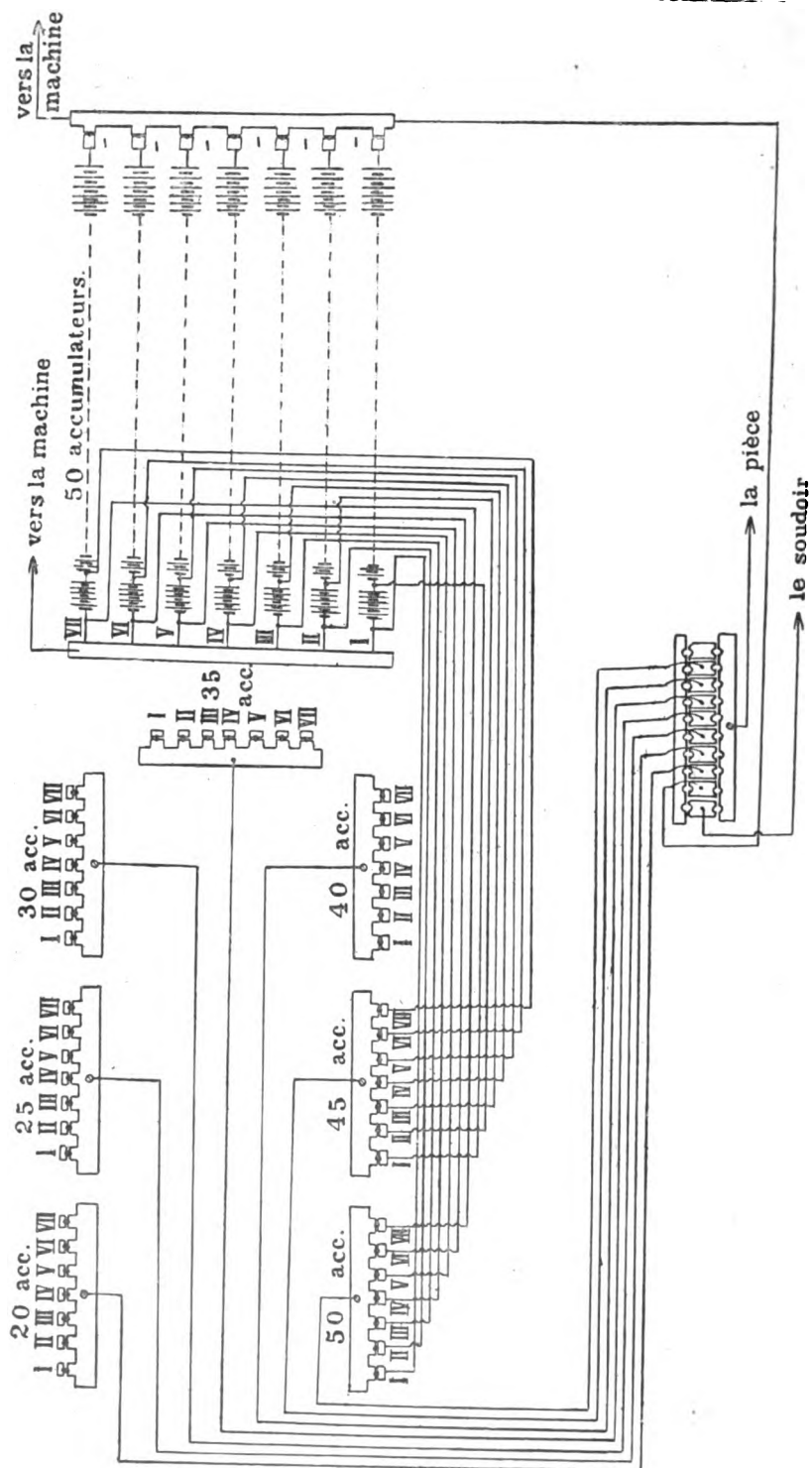


Fig. 34.

Le voltmètre est commun pour tous les circuits.

Le tableau de distribution se distingue par l'absence complète des rhéostats.

L'usine a une batterie de 120 accumulateurs (fig. 33) préparés à l'usine même. Chaque accumulateur contient 3 plaques positives et 4 négatives. Le poids de plomb de chaque accumulateur est 56 kg. L'atelier occupe 144 m² et contient une grue, le fourneau pour chauffage préalable des pièces, le support et le fourneau pour la calcination des plaques de coke.

L'expérience a démontré, encore en 1891, que même si on ne travaille qu'une quinzaine d'heures par mois, les bénéfices résultant des réparations exécutées rachètent toutes les dépenses d'éclairage.

Dans les *Ateliers de Roslawle*, on applique exclusivement la méthode de Bénardos. Une machine à vapeur, 30 chevaux, met en mouvement une machine Siemens excitée en dérivation, 70 A et 110 V, qui charge une batterie de 350 accumulateurs de Bénardos, type Planté.

Les accumulateurs sont composés de 7 plaques (4 — et 3 +). Elles ont l'air de grillages dont les vides ne sont pas remplis et sont isolées l'une de l'autre par des bouchons en caoutchouc.

Largeur des plaques . . . 160 mm.

Longueur 200 mm.

Le poids d'un accumulateur est 9,8 kg. Avec courant de décharge égale à 3 A par kg. de plomb, un accumulateur peut donner, dans le circuit extérieur,

9,8 kil. $\times$ 3 soit environ 30 A.

Leur capacité est très faible.

Tous les accumulateurs sont divisés en 7 batteries

réunies entre elles en dérivation (fig. 34). Ils sont disposés de manière à pouvoir donner les combinaisons suivantes : 7 batteries à 50 piles en série ou 7 à 45, ou 7 à 40, ou 7 à 35, ou 7 à 30, ou 7 à 25 et enfin 7 batteries à 20 piles.

La plupart des petits travaux se font à une tension de 40 à 50 V, c'est à dire 20 à 25 accumulateurs en série et le charbon doit avoir un diamètre de 15 à 20 mm. Pour les grandes surfaces, on prend 40 accumulateurs en série. Le prix d'installation complète est d'environ 40 000 francs. Une heure de travail revient à fr. 8,60 et pendant l'année on a environ 3 000 heures de travail.

A l'*usine de Kolomna*, on emploie les deux méthodes. On se sert d'une batterie de 1 000 accumulateurs, système Bénardos. Le système de distribution se distingue seulement de celui de Roslawle par une disposition qui permet de travailler en même temps avec trois soudoirs. Ordinairement on ne se sert que de 600 accumulateurs. Les accumulateurs sont divisés en 25 batteries, dont chacune a 40 piles en série; les batteries sont réunies en dérivation.

A l'*usine de Néva* est installée une batterie de 400 accumulateurs. Les dimensions et le système de distribution sont les mêmes qu'à Roslawle et Kolomna. La méthode de Bénardos n'est employée que pour la réparation des défauts et pour augmenter l'épaisseur du métal dans le cas où on ne la trouve pas suffisante après l'écrouissage.

(*Applaudissements.*)

M. Del Proposto, *président*, remercie M. Hefter de sa contribution à l'étude de la soudure électrique que les auditeurs ont écoutée avec beaucoup d'intérêt.

La séance est levée à midi et demi.

SÉANCE DU 24 AVRIL 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Andouche, Aragon, Bardiaux, Bedoret, Betocchi, Bodde, Boniface, Boubnoff, Boulanger, Bouva, Callet, Cheftel, Comi, Cons, Cousin, Crudenaire, Dalemont, De Bast, Decroës, de Grimouard, Delori, Del Proposto, de Metz, de Nonancourt, de Ryckère, de Waal, Foucault, Gérard A., Hefter, Henrion A., Henrion M., Herzen, Hoogwinkel, Ivanoff, Leguillon, L'Hoest, Lopatine, Manzoni, Marchand, Martin Gabriel, Masson, Maternowski, Maus, Mélotte, Micheels, Mugica, Nuzzaci, Passet, Raudot, Riboni C., Roland, Roussakoff, Schiesari, Vandecapelle, Weinstok, Wilkin, Zocchi.

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

M. le Président. — Nous venons d'apprendre la mort d'un de nos membres, M. Van Kesteren, décédé à Bruxelles au début d'une carrière qui s'annonçait pleine d'avenir. Vous savez, Messieurs, la part active que notre regretté camarade a prise à nos travaux. Tardivement prévenu du jour des funérailles, le Comité a prié M. van der Wallen de le représenter à cette cérémonie.

M. van der Wallen, retenu à Bruxelles, par suite de la mort de notre camarade, nous avait fait part de ce qu'il ne pourrait assister à cette séance. La communication de son travail est donc ajournée; j'aborderai la mienne qui figure au 2^o de l'ordre du jour.

M. De Bast, vice-Président, au fauteuil.

M. Del Proposto expose l'étude ci-après :

Le réglage de la tension dans les distributions à trois fils à courant continu.

Tout système de réglage d'une distribution à trois fils doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° Maintenir dans les limites requises pour le bon fonctionnement des appareils récepteurs, la différence de potentiel entre les conducteurs extrêmes du réseau.

2° Répartir également la tension totale entre les deux ponts de la distribution.

Les modes de réglage varient suivant que les feeders alimentant le réseau sont à trois conducteurs ou à deux seulement, reliés aux fils extrêmes.

Dans le premier cas que nous voulons considérer tout d'abord, le réglage se fait à l'usine génératrice sur les indications de voltmètres reliés par des fils pilotes à des points déterminés du réseau ou par un système équivalent. Chaque unité génératrice se compose de deux dynamos identiques reliées en série.

S'il s'agit d'un réseau d'éclairage ou de toute autre distribution dans laquelle la demande varie lentement, le réglage de la tension satisfaisant aux deux conditions sus-indiquées peut être fait à la main, soit en agissant sur les excitations des dynamos, soit en réglant le nombre d'éléments de deux batteries d'accumulateurs mises en parallèle sur chaque pont. On fait parfois usage d'égalisateurs de tension à l'usine génératrice même.

Sans discuter l'efficacité des systèmes indiqués au point de vue technique et économique (ce qui sortirait de notre cadre), nous observerons qu'aucun d'eux ne peut atteindre son but lorsque les variations de charge dans les deux ponts sont très brusques et considérables. On a imaginé des appareils basés sur l'emploi de relais faisant automatiquement les opérations de réglage ; mais eux aussi sont insuffisants dans de telles conditions, le retard avec lequel ils fonctionnent rendant bien souvent le réglage illusoire.

Pour pouvoir obtenir des résultats satisfaisants, même dans le dernier cas, il est nécessaire d'employer un

système dans lequel le réglage n'est pas obtenu par le fonctionnement successif de pièces en mouvement, l'inertie de ces dernières ne permettant pas de faire le réglage immédiatement après le dérèglement.

Le système suivant ne comportant qu'un simple arrangement des excitations des machines, nous semble satisfaire à tous les desiderata.

Soit un feeder à trois fils alimentant, par un couple de machines, une distribution dans laquelle le nombre des récepteurs varie entre les plus grandes limites et très brusquement; on veut maintenir constante la tension entre les fils extrêmes aux bouts du feeder et répartir également cette tension entre les deux ponts de la distribution.

Supposons le problème résolu et soit V la différence de potentiel entre A et B et entre B et C (fig. 1). Soit R

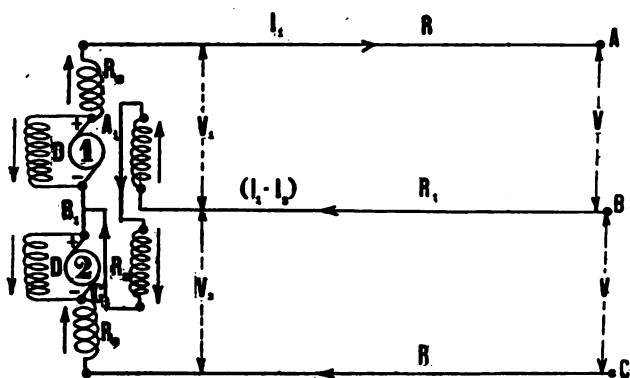


Fig. 1.

la résistance des conducteurs extrêmes, R_1 celle du conducteur du milieu, I_1 la demande de courant dans l'un des ponts de la distribution, I_2 la demande dans

l'autre pont : le conducteur du milieu sera parcouru par un courant $I_1 - I_2$ et on aura

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V + I_1 R + (I_1 - I_2) R_1 \\ V_2 &= V + I_2 R - (I_1 - I_2) R_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

Ces équations indiquent quelle doit être la loi de variation de la différence de potentiel aux bornes des deux machines en fonction des courants I_1 , I_2 débités par chacune d'elles. Elles indiquent clairement comment on peut y satisfaire pour toutes les valeurs de I_1 et I_2 .

Il faut pourvoir chaque machine :

1° D'un enroulement en dérivation D capable d'assurer aux bornes une différence de potentiel V en circuit ouvert ($I_1 = I_2 = 0$);

2° D'un enroulement en série R_s suffisant pour compenser la chute de potentiel dans l'armature et dans l'enroulement même, ainsi que la réaction d'induit et la chute de voltage due à la résistance R d'un des fils extrêmes;

3° D'un enroulement supplémentaire parcouru par le courant $(I_1 - I_2)$ du fil du milieu et ajoutant son action à celle des deux enroulements sus-indiqués lorsque la machine considérée est la plus chargée, ou la retranchant s'il s'agit de la machine la moins chargée. Cet enroulement doit relever ou abaisser la force électromotrice de la machine de $(I_1 - I_2) (R_1 + 2 R'_s)$, R'_s étant la résistance de l'enroulement même.

La fig. 1 indique les connexions des deux machines avec le feeder.

On peut résoudre la question d'une façon différente : les équations (1) en indiquent les moyens; elles peuvent en effet être écrites sous la forme

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V + I_1 (R_1 + R) - I_2 R_1 \\ V_2 &= V + I_2 (R_1 + R) - I_1 R_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

qui montre qu'il faut pourvoir chaque machine d'une excitation en série capable de compenser la chute de potentiel dans l'armature, dans l'enroulement en série, dans la résistance $(2 R_1 + R)$ et la réaction d'induit. Une partie de cette excitation, capable de compenser la chute de potentiel dans la résistance R_1 , doit toujours être antagoniste. La fig. 2 montre la disposition qui résulte du reste directement des équations (2).

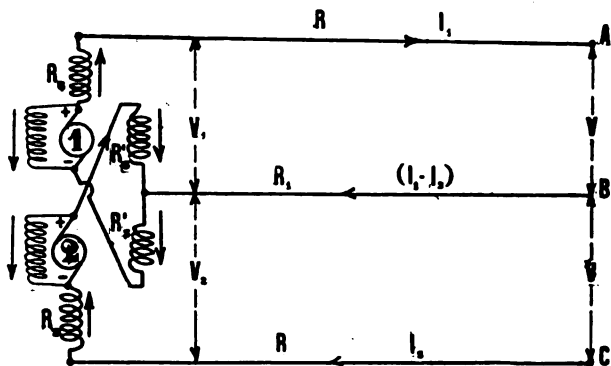


Fig. 2.

Il est toutefois à remarquer que cette seconde solution est bien inférieure à la première, car, à égalité de circuit magnétique des machines, elle demande un nombre d'ampères-tours d'excitation beaucoup plus considérable, soit parce que l'excitation de chaque machine est toujours différentielle, soit parce qu'en général $R_1 > R$.

À égalité de poids de cuivre employé elle aurait donc un plus mauvais rendement ; c'est pourquoi nous n'en dirons pas davantage.

Inutile d'ajouter que le moteur actionnant l'ensemble des deux machines doit être, en tous cas, à même de marcher à vitesse constante malgré les variations brusques de la charge.

Pour la détermination de l'excitation de chaque machine, dans la première solution, on procédera de la façon suivante : On calculera d'abord le nombre d'ampères-tours total (mi) pour avoir, avec le courant normal, une différence de potentiel V aux extrémités des résistances $(R_s + R'_s + R + R_l)$, puis le nombre d'ampères-tours $(mi)_1$ pour avoir, toujours avec le courant normal, la même différence de potentiel aux extrémités des résistances $(R + R_s)$ et enfin les ampères-tours $(mi)_2$ pour avoir le voltage V aux bornes à circuit ouvert. Les ampères-tours $(mi) - (mi)_1$ seront attribués à l'enroulement en série supplémentaire, les ampères-tours $(mi) - (mi)_1 - (mi)_2$ à l'enroulement en série R , et le reste à l'excitation en dérivation.

Comme pour les machines compound ou hypercompound, il est nécessaire d'étudier la carcasse de façon que la caractéristique à circuit ouvert des deux dynamos, qui seront aussi égales que possible, soit rectiligne au delà du coude, et qu'à circuit ouvert le fonctionnement corresponde à un point placé au delà du coude de la courbe du magnétisme.

Par suite des variations brusques de la charge de chaque machine, il y aura des variations brusques du flux, qui nécessiteraient une variation continue et correspondante du calage des balais pour éviter les étincelles.

Comme cela est irréalisable, il faut appliquer dans l'étude de ces machines les précautions conseillées dans des cas analogues pour réduire au minimum les étincelles aux balais, qui resteront ainsi calés invariablement en une position moyenne.

Le système indiqué est d'une simplicité remarquable et d'un fonctionnement sûr et prompt; aussi il nous semble à conseiller dans beaucoup de cas et surtout dans ceux

dans lesquels les autres systèmes de réglage indiqués seraient défectueux ou inefficaces. La traction électrique à trois fils et les transports de force aux distances moyennes pourraient plus spécialement l'employer très-utilement.

Il faut cependant faire remarquer qu'un couple de machines, tel que celui que nous venons de décrire, ne peut servir que pour le feeder pour lequel il a été calculé, et que ce feeder ne peut pas être alimenté éventuellement par un autre couple de machines mis en parallèle avec le premier.

On peut cependant, en prévision de ce couplage, pourvoir les machines de bornes auxiliaires partageant les excitations en série en deux parties, la totalité de ces excitations étant employée lorsque le groupe de machines alimente seul le feeder, tandis qu'une partie resterait hors de circuit, ou en court-circuit, lorsque ce groupe travaille en parallèle avec les autres. La même disposition pourrait du reste être employée pour pouvoir relier un groupe de machines successivement à des feeders de résistances différentes. Grâce à ce dispositif on peut donc relier les couples de machines en parallèle; mais il reste toujours l'inconvénient de ne pas pouvoir relier aux mêmes barres du tableau de distribution les extrémités des feeders ayant la même résistance. Les conditions de réglage ne pourraient alors être atteintes que dans le cas où le courant total se partagerait entre les feeders proportionnellement à leur section, ce qui, en général, n'arrive pas. En tous cas, le rendement moyen d'un couple de ces machines est supérieur à celui de l'ensemble des dynamos et des appareils de réglage (accumulateurs, égalisateurs de tension, etc.) satisfaisant aux mêmes conditions de fonctionnement; en outre, le réglage étant

absolument automatique, il n'y a effectivement aucun réglage à faire, excepté celui de la vitesse.

Nous ajouterons finalement que tous les bobinages d'une des machines d'un couple peuvent être déterminés expérimentalement, et qu'il y a moyen, par l'emploi de résistances en série ou en parallèle, suivant le cas, de parer aux différences magnétiques éventuelles entre les deux machines.

Lorsque le réseau à trois fils est alimenté par des feeders à deux conducteurs, la constance de la tension entre les fils extrêmes est assurée par un réglage des dynamos à la station génératrice, tandis que l'égale répartition de cette tension entre les deux ponts de la distribution est obtenue en général par l'emploi d'appareils connus sous le nom d'*égalisateurs de tension*, installés à proximité des appareils récepteurs aux endroits où l'on craint les dérèglages les plus grands.

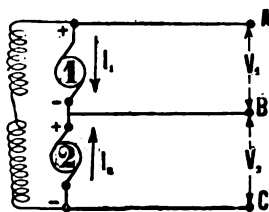


Fig. 3.

Comme on le sait, un égalisateur de tension ordinaire est constitué par deux machines identiques, dont les induits sont calés sur le même arbre et excités par le même courant comme l'indique la fig. 3. Si, par suite de l'égale répartition de la charge entre les deux ponts, $V_1 = V_2$, le système fonctionne comme un moteur marchant à vide. Les induits sont parcourus par un certain courant i_0 qui est en général très petit vis-à-vis des courants qui

parcourent les mêmes induits lorsqu'il existe un dérèglement sensible entre les deux ponts. C'est pourquoi dans ce qui suit nous ne nous occuperons pas d'examiner le fonctionnement de l'égalisateur lors d'un réglage qui change le courant dans l'un des induits de moins que i_0 . A un instant quelconque, lors d'un dérèglement, l'induit 1 absorbe un courant i_1 tandis que l'induit 2 débite un courant i_2 ; et le système des deux induits prend une certaine vitesse. Les voltages aux bornes des deux induits, qui sont les mêmes que ceux des deux ponts de la distribution, seront exprimés par

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= e_0 + i_1 r \\ V_2 &= e_0 - i_2 r \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

Dans ces expressions e_0 est la force électromotrice engendrée dans les induits et r leur résistance. Elles montrent nettement qu'un appareil ainsi étudié ne peut pas égaliser parfaitement les deux voltages puisque $V_1 > V_2$. On remarquera que ces machines fonctionnent alternativement comme moteur et comme dynamo, le sens de leur rotation étant cependant toujours le même. Il s'ensuit que les balais doivent nécessairement être calés invariablement à la ligne neutre, ce qui élimine sensiblement toute réaction de l'induit sur le flux inducteur. La force électro-motrice e_0 reste sensiblement constante, quels que soient i_1 et i_2 , puisque le courant d'excitation est constant et que la vitesse ne varie pas beaucoup pourvu que la différence de potentiel entre les fils extrêmes soit invariable. Puisque $V_1 - V_2 = (i_1 + i_2) r$, on en conclut que l'égalisateur égalise d'autant moins que le dérèglement entre les deux ponts est plus grand. Pour que $V_1 = V_2$, il faudrait que la résistance r des armatures fut nulle; aussi le réglage qu'un tel système peut réaliser est

d'autant plus parfait que la résistance des armatures est plus petite. Comme la résistance de ces dernières ne peut pas descendre en dessous d'une certaine limite, pour obtenir l'égalisation parfaite des voltages il faut modifier les forces électro-motrices des deux machines, de façon à renforcer celle de la dynamo fonctionnant comme génératrice et à affaiblir celle de la dynamo fonctionnant comme moteur.

Dans cet ordre d'idées, on peut améliorer les conditions de fonctionnement de l'égalisateur et même les rendre tout à fait satisfaisantes en interchangeant les excitations des deux machines comme l'indique la fig. 4.

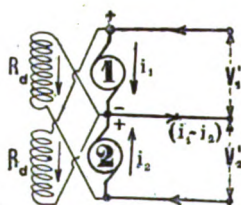


Fig. 4.

L'échange des excitations produit une augmentation $\frac{V_1 - V_2}{R_a}$ (fig. 3) dans le courant d'excitation de la machine 2 et une diminution égale dans l'excitation de la machine 1. Appelons K la constante par laquelle il faut multiplier la différence de potentiel appliquée aux inducteurs d'une machine pour avoir la force électromotrice développée dans celle-ci. On peut écrire pour la disposition de la fig. 4

$$\begin{cases} V'_1 = e_0 + i_1 r - K(V_1 - V_2) = e_0 + i_1 r - Kr(i_1 + i_2) \\ V'_2 = e_0 - i_2 r + K(V_1 - V_2) = e_0 - i_2 r + Kr(i_1 + i_2) \end{cases}$$

de là on déduit

$$V'_1 = V'_2 = e_0 + \frac{r}{2} (i_1 - i_2) \quad (4)$$

si

$$K = \frac{1}{2}.$$

Il est donc possible, en étudiant convenablement le circuit magnétique des deux machines, de réaliser par ce moyen un réglage pratiquement exact.

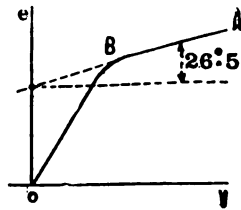


Fig. 5.

Il suffit que la partie BA de la caractéristique à circuit ouvert de chaque machine, fig. 5 (e force électromotrice induite, V différence de potentiel appliquée aux inducteurs) fasse un angle de $26^{\circ}5'$ avec l'horizontale (tang. $26^{\circ}5' = \frac{1}{2}$).

Cette condition peut être satisfaite par un choix convenable des sections et des matériaux employés, la résistance du circuit magnétique restant dans les limites ordinairement requises pour avoir un bon rendement des machines. Cette disposition a l'avantage de ne pas employer d'enroulements supplémentaires qui compliquent l'ensemble et augmentent les pertes; par contre, elle demande

une étude particulière du circuit magnétique des machines. (*)

Une disposition qui fonctionne exactement de la même façon est celle qui est indiquée par la fig. 6.

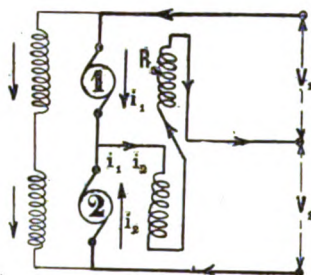


Fig. 6.

L'égalité des deux voltages est obtenue en renforçant l'excitation d'une des machines et en affaiblissant celle de l'autre d'une quantité proportionnelle à $(i_1 + i_2)$. On a en effet

$$V'_1 = e_0 + r i_1 + 2 R_s (i_1 + i_2) - K (i_1 + i_2)$$

$$V'_2 = e_0 - r i_2 - 2 R_s (i_1 + i_2) + K (i_1 + i_2)$$

et il est facile de vérifier que $V_1 = V_2$, si $K = \frac{r}{2} + 2 R_s$ et que

$$V_1 = V_2 = e_0 + \frac{r}{2} (i_1 - i_2) \dots \dots (5)$$

(*) Les deux dispositions qui vont suivre ont été revendiquées par la maison Siemens et Halske de Berlin (brevet allemand n° 93 365, du 14 août 1897). Dans le mémoire relatif à ce brevet, MM. Siemens et Halske prétendent que la disposition que nous venons de décrire ne peut pas réaliser l'égalisation des deux voltages ; nous ne sommes pas du même avis.

Quant à la section et au nombre de spires à donner à l'enroulement en série supplémentaire, on remarquera qu'il est parcouru par le courant $i_1 + i_2$. En appelant γ_1 le rendement industriel des induits supposé le même pour les deux machines à chaque instant, on aura $i_2 = \gamma_1^2 i_1$, et $i_1 + i_2 = (1 + \gamma_1^2) i_1$. Comme le rendement γ_1 est en général très élevé (0,90), $i_1 + i_2$ est presque le double de i_1 ($1,81 i_1$); la densité du courant étant fixée à l'avance, la section à donner à l'enroulement en question est déterminée. Le calcul du nombre d'ampères-tours nécessaire se fera comme celui d'une machine compound ordinaire pour avoir une différence de potentiel $V = V'_1 = V'_2$ aux bornes, lorsque le courant de l'induit est le courant normal, qui, dans ce cas, correspond au dérèglement prévu entre les deux ponts de la distribution. C'est le produit de ce courant par la moitié de la différence de potentiel entre les fils extrêmes qui détermine la puissance pour laquelle on doit calculer les machines.

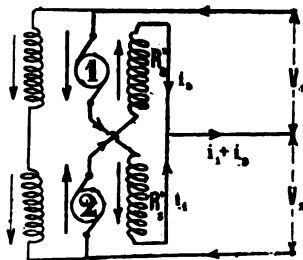


Fig. 7.

Au lieu de mettre l'enroulement supplémentaire sur le fil du milieu on peut le mettre en série avec chaque induit en réalisant toutefois les connexions comme l'indique la fig. 7. On a, en effet, pour cette dernière disposition

$$V'_1 = e_0 + i_1 (r + R'_s) - K i_2$$

$$V'_2 = e_0 - i_2 (r + R'_s) + K i_1$$

d'où on déduit

$$V_1 = V'_2 - e_0 + (i_1 - i_2)(r + R'_s) \dots (6)$$

si $K = r + R'_s$.

Il s'agit ici d'un véritable compoundage ordinaire; le système fonctionne comme l'ensemble de deux machines compound avec les excitations en série interchangeables.

Quant au choix entre les trois dispositions décrites, on remarquera que la 1^{re} est la plus simple et celle qui donnera le meilleur rendement puisqu'elle ne comporte pas d'enroulements supplémentaires. Par contre, elle a l'inconvénient de baser le réglage sur une allure spéciale de la courbe du magnétisme, dont l'obtention peut présenter quelques difficultés.

Les arrangements indiqués par les fig 6 et 7 n'entraînent pas ces difficultés; quelle que soit la courbe du magnétisme, pourvu qu'elle satisfasse aux conditions requises pour le compoundage ordinaire, elle peut servir au but avec une excitation en série comme il vient d'être indiqué, ces excitations pouvant d'ailleurs être modifiées par des résistances en parallèle.

Pour comparer les dispositions des fig. 6 et 7 entre elles, on remarquera que, puisque le courant i_1 ne diffère pas très sensiblement de i_2 , le courant qui provoque le compoundage est dans la disposition fig. 6 à peu près le double de celui qui sert au même but dans la disposition fig. 7. Comme la force magnéto-motrice supplémentaire requise pour chaque machine est à peu près la même dans les deux cas, si la densité de courant est la même, la longueur de l'enroulement en série est, dans le premier, la moitié environ de celle nécessaire dans le second et les pertes par effet Joule dans l'enroulement supplémentaire sont les mêmes. Au point de vue du rendement,

les deux dispositions sont donc équivalentes ; la disposition fig. 7 serait alors préférable ; elle peut être réalisée par deux machines compound ordinaires.

Il y a une remarque qui s'applique toutefois aux trois solutions du problème et qui a une réelle importance : ces solutions demandent, en effet, toutes l'emploi de deux machines absolument séparées ; celles-ci ne peuvent avoir ni le même système inducteur, ni le bobinage de l'induit fait sur le même noyau, dispositions souvent employées dans les égalisateurs de tension ordinaires (fig. 3) et qui diminue le prix des machines et améliore le rendement total.

Un autre élément important pour le fonctionnement des égalisateurs de tension est la vitesse de rotation de leurs induits. Considérons d'abord l'égalisateur de tension ordinaire (fig. 3).

Les équations (3) peuvent être écrites comme suit :

$$e_0 = V_1 - i_1 r = n N \mathfrak{K}_0$$

$$e_0 = V_2 + i_2 r = n N \mathfrak{K}_0$$

d'où

$$(7)... N = \frac{V_1 - i_1 r}{n \mathfrak{K}_0} = \frac{V_2 + i_2 r}{n \mathfrak{K}_0} = \frac{V_1 + V_2 - (i_1 - i_2) r}{2 n \mathfrak{K}_0} ;$$

n est le nombre de fils comptés à la périphérie de l'induit et $\mathfrak{K}_0$ le flux créé par l'excitation à travers l'armature ; $V_1 + V_2$ est la différence de potentiel entre les fils extrêmes que nous supposons constante. Le nombre de tours par seconde N diminue lorsque $(i_1 - i_2)$ augmente. En appelant τ le rendement industriel des induits, on doit avoir $\tau_1^2 = \frac{V_2 i_2}{V_1 i_1}$ et puisque V_1 ne diffère pas beaucoup de V_2 , on peut écrire approximativement

$$\tau_1^2 = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{et} \quad i_1 - i_2 = i_1 (1 - \tau_1^2).$$

De là on déduit que $i_1 - i_2$ augmente, et que par conséquent la vitesse diminue, pour toute augmentation de i_1 , si le produit $i_1 (1 - r_1^2)$ augmente, et qu'elle augmente si pour une augmentation de i_1 ce produit diminue.

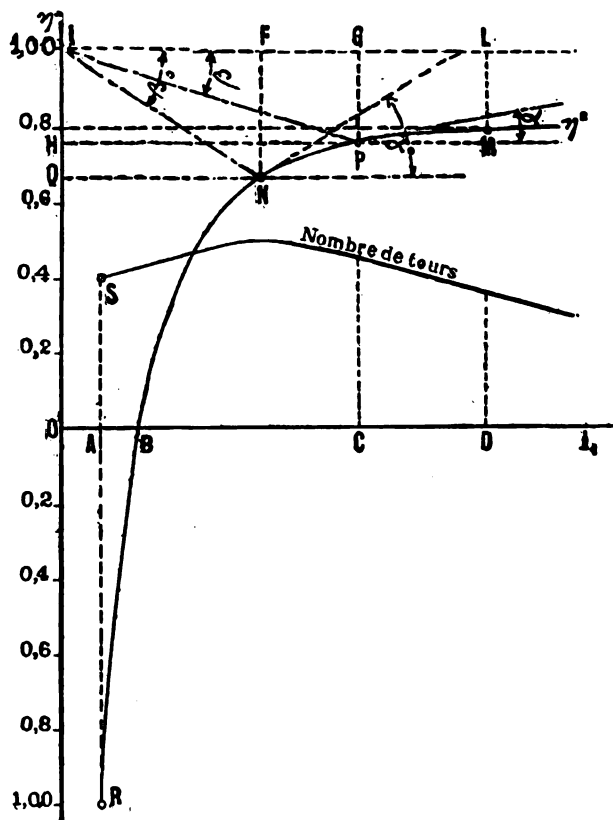


Fig. 8.

L'équation (7) peut s'écrire

$$N = V_1 + V_2 - \frac{(1 - r_1^2) i_1 r}{2 \pi \lambda_0}$$

en la différentiant par rapport à η^2 et à i_1 , on a

$$(8). \dots dN = r \frac{-di_1 (1 - \eta^2) + i_1 d\eta^2}{2 n \mathcal{H}_0}.$$

Pour un courant donné i_1 à travers l'induit de la machine fonctionnant comme moteur, la vitesse augmente avec i_1 si

$$-di_1 (1 - \eta^2) + i_1 d\eta^2 > 0, \quad \text{ou} \quad \frac{d\eta^2}{di_1} > \frac{1 - \eta^2}{i_1};$$

dans le cas contraire une augmentation de i_1 entraîne une diminution de la vitesse. Cette dernière est maxima lorsque $\frac{d\eta^2}{di_1} = \frac{1 - \eta^2}{i_1}$. Tâchons de nous rendre compte graphiquement des conclusions analytiques que nous venons de trouver.

Soit R B N M la courbe représentant le carré du rendement d'un des induits (*); O A est le courant de circulation des deux induits lorsque les deux ponts sont équilibrés ou, pour mieux dire, lorsque $V_1 = V_2$; à ce moment là le produit des rendements des deux machines, suivant les conventions faites, doit être considéré comme égal à -1 , car la machine 2 ne donne pas d'énergie, mais elle en absorbe au contraire une quantité égale à celle de l'autre machine. O B est le courant absorbé par la

(*) A la rigueur, il faudrait tracer la courbe du produit $\eta_1 \eta_2$ des rendements des deux induits, puisque pour chaque valeur de i_1 la charge des deux induits est différente. Comme nous ne pouvons faire ici que des raisonnements qualitatifs et que d'autre part nous avons déjà admis que l'égalisateur égalise parfaitement, ce qui n'est pas exact, on peut aussi admettre qu'à chaque instant le rendement des deux induits est le même, et parler du carré de ce rendement au lieu du produit des deux. Rien n'empêche, d'ailleurs, de considérer la courbe R B M N comme celle du produit $\eta_1 \eta_2$.

machine 1 lorsque la différence de potentiel aux bornes de la machine 2 est égale à sa force électro-motrice. La partie BR de la courbe se rapporte donc à la période pendant laquelle les deux machines fonctionnent comme moteurs, et la partie BM à la période pendant laquelle la machine 2 fonctionne comme génératrice. Pour un point P de cette courbe $OC = i$, $GP = 1 - \eta^2$ $\frac{1 - \eta^2}{i_1} = \tan \varphi$ et finalement $\frac{d\eta^2}{di_1}$ est la tangente de l'angle α que la tangente à la courbe au point P fait avec l'axe des abscisses. Le produit $(1 - \eta^2) i_1 = (i_1 - i_2)$ est représenté par la surface du rectangle I G P H, celle-ci multipliée par r donne la quantité $(i_1 - i_2)r$ qui détermine la variation de N suivant l'expression (8). Si l'on trace le même rectangle pour le point M, on obtient évidemment une surface plus grande, par conséquent lorsque i passe de la valeur OC à la valeur OD la vitesse diminue.

Le point N est celui qui correspond à la vitesse maxima; il a été trouvé par tâtonnements de façon que $v_0 = 1\%$. Il est aisé, à l'aide du diagramme, de tracer l'allure de la courbe donnant le nombre de tours N de l'égalisateur en fonction du courant i_1 : cette courbe aura une forme analogue à ST; S étant le point dont l'ordonnée est le nombre de tours lorsque $i_1 = i_2$.

Quant à l'importance des variations de vitesse, nous dirons que ces dernières sont en général faibles. On remarquera, en effet, que la vitesse de l'égalisateur varie encore moins que celle de l'ensemble des deux machines fonctionnant comme moteurs reliés en série et alimentés à différence de potentiel constante; car, dans ce dernier cas, on aurait

$$N_1 = \frac{V_1 + V_2 - 2 i r}{2 \mathfrak{N}_0 n}$$

i étant le courant commun des deux induits; et on a évidemment $dN_1 > dN$ pour une même variation du même courant dans l'induit de l'égalisateur qui fonctionne comme moteur.

De ce qui précède, on déduit donc qu'un égalisateur de tension ordinaire n'a pas sa vitesse minima ou maxima à vide, et que son fonctionnement, même au point de vue qualitatif, ne doit pas être expliqué en admettant, comme on le fait souvent, qu'en augmentant la différence $V_1 - V_2$ (ce qui arrive lors d'une augmentation du dérèglement) la vitesse augmente; nous venons de voir qu'il peut bien souvent arriver le contraire. D'ailleurs, ce genre d'explication ne pourrait pas être appliqué aux dispositions des fig. 6 et 7, car, dans celles-ci, V'_1 est toujours égal à V'_2 .

Tout ce que nous venons de dire relativement à la vitesse de rotation des égalisateurs de tension s'applique, sans aucune modification, aux trois dispositions décrites pour obtenir le partage parfait de la tension totale.

On remarquera toutefois qu'au point de vue de la promptitude du réglage, il faut préférer la disposition qui, à égalité de dérèglement, donne la moindre variation de vitesse. Des expressions (4) (5) et (6), en appelant V la différence de potentiel entre les fils extrêmes et en conservant les notations précédentes, on tire

$$N = \frac{V - r(i_1 - i_2)}{2n\mathfrak{K}_0}$$

pour les dispositions des fig. 4 et 6;

$$N = \frac{V - 2(R'_s + r)(i_1 - i_2)}{2\mathfrak{K}_0 n}$$

pour la disposition de la fig. 7.

De là on déduit que les dispositions des fig. 4 et 6 donnent les mêmes vitesses pour les mêmes valeurs de $(i_1 - i_2)$. Cependant, pour une variation di du courant à travers l'induit fonctionnant comme moteur, la variation de $(i_1 - i_2)$ est plus grande dans la disposition de la fig. 6 que dans la disposition de la fig. 4, parce que le rendement η d'un des induits est, dans la première, plus petit que dans la seconde, à cause des pertes dues à l'enroulement en série supplémentaire; les différences ne peuvent cependant être que très faibles.

Par contre, la disposition de la fig. 7, pour une même variation di du courant à travers l'induit fonctionnant comme moteur, donne une variation de vitesse plus que double de celle que l'on aurait dans les dispositions des fig. 4 et 6. Aussi ne doit elle pas être préférée, malgré sa simplicité, lorsque la promptitude du réglage est une qualité nécessaire.

De ce qui précède, on déduit que, dans tous les égalisateurs de tension, la vitesse est une fonction du dérèglement et que, par conséquent, ces appareils ne peuvent guère atteindre leur but lorsque les dérèglages sont grands et très brusques.

Les dispositions décrites ayant pour but de rendre le fonctionnement des égalisateurs de tension plus conforme à leur nom, ne sont applicables qu'aux réseaux à trois conducteurs. Nous venons de voir, en effet, qu'en tous cas, l'égalisation est produite par une action réciproque entre les deux machines, et qu'à chaque dérèglement correspond une vitesse déterminée des deux induits. Dans un réseau à cinq fils, par exemple, le courant dans un des induits de l'égalisateur est fonction du dérèglement dans les quatre ponts à la fois, et il devrait en être de même pour son excitation supplémentaire; en outre, les induits ne pourraient pas avoir la même vitesse. Il est

cependant possible d'employer deux égalisateurs indépendants comme ceux que nous avons décrits, l'un d'eux maintenant le voltage du premier pont égal à celui du second, l'autre atteignant le même but pour le troisième et le quatrième; tandis que l'égale répartition du voltage total entre le premier et le troisième fil et entre celui-ci et le cinquième, devrait être assuré par un réglage fait à la station centrale ou par des égalisateurs reliés à ces fils; on pourrait ainsi alimenter le réseau par des feeders à trois conducteurs ou à deux seulement.

(Applaudissements.)

M. De Bast, vice-Président, remercie M. Del Proposto, au nom de l'assemblée, pour l'étude originale qu'il vient d'exposer. L'analyse du fonctionnement des égalisateurs de potentiel est très complexe; M. Del Proposto a eu le grand mérite de nous la présenter sous une forme très-claire et suffisamment précise pour les applications.

La séance est levée à midi.

CHRONIQUE.



Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Feron, Emile, avec M^{lle} Nelly Vanderborght.



SÉANCE DU 29 MAI 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Berger, Bisacco, Boubnoff, Boulanger, Briffaux, Centonze, de Bast, de Grimouard, Della Riccia, Del Proposto, de Ryckere, Duchesne, Herzen, Leguillon, L'Hoest, Manzoni, Mari, Masson, Mélotte, Moens, Mugica, Ottavi, Raudot, Roussakoff, Schopoff, Tart, Van der Hecht, Van der Wallen.

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

M. Del Proposto, président. — Les comptes d'installation du local viennent d'être clôturés. La dépense totale s'élève à fr. 3 877-09, somme que M. Montefiore a immédiatement mise à notre disposition, ainsi qu'il en avait d'ailleurs exprimé l'intention. Dans cette somme ne sont pas compris les dons en nature que notre président d'honneur nous a faits, telle la superbe garniture de cheminée de notre salle de séance.

Nous aurons très prochainement l'occasion d'exprimer au donateur la gratitude de l'Association.

(Applaudissements).

M. Van der Wallen prend ensuite la parole pour exposer le contenu de la note suivante :

La traction mécanique et électrique des bateaux sur les canaux.

La navigation sur les canaux est restée jusqu'à ce jour considérablement en retard surtout lorsque l'on considère le grand développement qu'ont pris, en ces dernières années, les différents modes de traction.

L'on voit, en effet, partout où circulent les péniches, le halage animal résister victorieusement aux nombreuses tentatives faites en vue de lui substituer des moyens mécaniques de traction. Mais, avant d'aborder l'étude

des divers systèmes de traction mécanique des bateaux, voyons les cas où il y a intérêt à substituer à la force des hommes et des chevaux les engins perfectionnés de la mécanique.

Sur les canaux et, en général, sur toutes les voies navigables, établies d'après le gabarit consacré en France par la loi du 5 août 1879, la marche par convois n'est pratiquement réalisable que sur les biefs d'une grande longueur. Elle devient matériellement impossible sur les biefs courts que l'on rencontre à la partie supérieure des canaux à point de partage. D'ailleurs, fût-elle exceptionnellement possible, qu'il faudrait, le plus souvent, la bannir comme très onéreuse.

Il faut sur tout canal qu'un bateau puisse partir aussitôt qu'il est chargé et s'arrêter quand bon lui semble pour décharger ou reprendre du fret. Il faut supprimer les arrêts en route, abréger le passage des écluses, faciliter la traversée des sous-terrains.

Le remorquage, sous toutes ses formes, est écarté en principe; il ne reste véritablement que le halage. Il y a donc peu de probabilités pour qu'il décline, car tous les canaux ont été créés pour lui; il y en a peut être un peu pour qu'il progresse. C'est à l'améliorer, à le rendre mécanique et économique, que doivent tendre tous les efforts.

Sur les fleuves et dans les canaux à grande section le problème est tout différent. Le touage et le remorquage sont les seuls moyens pratiques qui peuvent être utilisés.

Le touage sur chaîne rend des services incomparables sur des cours d'eau rapides et peu profonds, ayant au moins une pente de 0,30 mètre par kilomètre. Le tirant d'eau augmentant et la pente devenant inférieure à 25 cm, le toueur voit sa supériorité bien atténuée à la remonte. A la descente, la préférence reste toujours au remorqueur;

car le toueur est rivé à sa chaîne et si le courant est rapide le bateau traîné ira plus vite que lui et viendra le rencontrer.

Au point de vue économique, le toueur l'emporte à égalité de rendement de la machine ; la consommation du combustible est d'environ 1/3 de celle des remorqueurs. Mais il offre l'inconvénient d'être lié à une chaîne, ce qui fait que si le trafic chôme le touage reste sans effet utile. Le remorqueur, au contraire, a un champ d'action beaucoup plus vaste ; il jouit d'une complète indépendance et a devant lui, non pas une seule voie, mais tout un réseau de voies ; de plus son capital de premier établissement est beaucoup plus faible.

Quelques grandes sociétés de remorquage possèdent en même temps des vapeurs à roues et à hélice, de manière à tirer le meilleur parti possible de leur matériel. Les vapeurs à roues offrent l'avantage de n'avoir qu'un faible tirant d'eau ; ils conviennent donc pour les voies navigables larges et peu profondes ; par contre, ils entraînent plus de frais pour leur construction et leur exploitation. Ils ne deviennent avantageux que pour des bateaux de grandes dimensions avec de fortes machines ; ils sont alors précieux pour les sections à forte chute.

Une solution, fort séduisante, consistant dans l'emploi de remorqueurs-toueurs a été préconisée par la Cie de touage de la Basse Seine et de l'Oise. Ce sont des remorqueurs munis d'un appareil de touage ; à la remonte, ils agissent comme toueurs et conduisent leur train à destination sans troquages ; à la descente, ils fonctionnent comme remorqueurs libres.

Un service organisé dans ces conditions, profitant des avantages des deux systèmes, gagne donc en régularité, en célérité, en puissance de trafic et en économie.

MM. Molinos et de Bovet, au cinquième Congrès de

navigation, disaient que le touage ainsi perfectionné constituerait la meilleure solution de la traction sur les rivières canalisées ou à courant libre.

Ils lui attribuaient les avantages suivants :

1^o Par rapport au système de touage communément employé ;

Diminution considérable de l'usure de la chaîne, suppression des causes principales de ruptures, suppression du service des relais, meilleure utilisation du matériel, augmentation de la puissance de trafic, réduction des dépenses d'exploitation. Possibilité d'effectuer la traction à la descente dans les mêmes conditions que les remorqueurs ordinaires.

2^o Par rapport aux remorqueurs ;

Egalité en basses eaux,

Supériorité incontestable en hautes eaux.

Pour qu'un tel service soit rémunérateur, il faut que le trafic soit assez considérable et les écluses suffisamment grandes pour recevoir un train de bateaux ; dans le cas contraire, les biefs devraient être assez longs pour que les convois puissent regagner en route le temps qu'ils perdent aux écluses.

Le sasement d'un convoi de 4 bateaux, par exemple, exige 2 heures, tandis qu'un bateau isolé franchit une écluse en moins de 30 minutes.

Un tel convoi perd donc une heure trente à chaque écluse.

L'expérience démontre que la vitesse moyenne d'un semblable convoi ne peut dépasser 3 kil. 600 à l'heure sur un canal qui dessert une fréquentation active, tandis que celle d'un bateau halé par des chevaux atteint normalement 2 kilomètres.

D'après ces bases, un convoi devrait parcourir 6 kil. 750 pour regagner une heure trente.

Le touage par trains de 4 bateaux ne pourrait, dès lors, être pratiqué, sans désavantage, au point de vue de la vitesse, que dans une série de biefs d'au moins 6 kil. 750 chacun (*).

Une autre solution est le bateau porteur et moteur. En principe, il paraît être une erreur; la machine et l'équipage supplémentaire qu'elle nécessite sont mal utilisés à cause des longs arrêts nécessaires pour le chargement et le déchargement; la coque elle-même l'est mal à cause de la place occupée par la machine et ses accessoires. Ils peuvent cependant être une solution très avantageuse dans le cas d'un transport de marchandises de prix nécessitant une grande vitesse.

Les objections précédentes semblent cependant diminuer d'importance par l'emploi des moteurs à gaz et à pétrole.

L'emploi de ces machines a fait, au Congrès de Manchester, l'objet d'une étude intéressante de la part de M. Bailey, et M. Busser, à Paris et à La Haye, a clairement indiqué tout le parti qu'on pouvait en tirer.

Nous ne nous arrêterons pas aux hydrocarbures, aux naphthes et aux benzines qui avaient trouvé emploi pour des bateaux de faibles dimensions avec des machines de force réduite. Nous signalerons seulement une des tentatives les plus heureuses qui aient été faites dans l'application du moteur à gaz à la navigation fluviale.

Une société française, la « Seine maritime », effectue des transports rapides entre la Manche, Rouen et Paris, au moyen de chalands actionnés par des machines dont l'agent-moteur est le gaz d'éclairage.

(*) Des convois de 3 bateaux exigeraient des biefs d'au moins 4,500 kilomètres.

Celui-ci est contenu dans des tubes en acier sous une pression d'environ 100 kil. par cm^2 ; ils ont 250 mm. extérieur, 8 mm. d'épaisseur et une longueur de 5 m. Ils contiennent 22 m^3 et pèsent 325 kil. Tous ces tubes sont reliés en batterie sur le pont du chaland au nombre de 80 et sont reliés entre eux par des joints flexibles.

Ce gaz détendu à la pression convenable alimente un moteur vertical, à 2 cylindres, de 40 chevaux du type « Simplex », de MM. Delamare-Deboutville et Malandin.

Son arbre de couche actionne une hélice du système « Mac Glasson » à pas variable et réversible; ce qui permet d'obtenir toutes les vitesses, depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse maximum, sans avoir besoin, pour cela, de faire varier celle de la machine motrice. Le renversement de marche s'obtient grâce à une combinaison de leviers fort simple.

Le personnel du bord se compose d'un homme pour la surveillance de la machine et d'un pilote qui commande de son banc de quart, simultanément, la direction et la propulsion du bateau.

Celui-ci est un chaland ponté de 300 tonnes de jauge brute, de 30 m. de long, 5,50 m. de large et 2,25 m. de creux, avec étrave droite et voûte à l'arrière, l'étambot est en fer forgé, le gouvernail est à large safran.

Les essais qui eurent lieu entre Le Havre et Tancarville montrèrent qu'une minute suffit pour mettre le moteur en marche; qu'à la vitesse de 180 à 250 tours par minute le chaland filait, avec une charge de 145 tonnes, une vitesse de 5,5 à 6 nœuds.

* * *

Tout problème de traction mécanique doit partir des données suivantes :

1^o Il doit être tenu à la disposition des mariniers répartis le long du canal une puissance minima de 3 à 4 chevaux effectifs par bateau.

2^o Cet effort de traction doit pouvoir être augmenté, fut-ce à vitesse réduite, au passage des écluses.

3^o Les appareils propulseurs doivent être légers, indépendants des bateaux et ne pas modifier ces derniers en projection horizontale.

Les systèmes connus jusqu'à présent peuvent se grouper dans les trois catégories suivantes :

a) Emploi d'un câble sans fin tenu en mouvement le long des berges et auquel peuvent s'attacher les bateaux.

b) Remplacement des chevaux de halage par des machines circulant le long du canal.

c) Installation momentanée à bord d'un moteur facile à mettre en place et à enlever, servant successivement aux bateaux montants et descendants de façon à être utilisé sans interruption.

Les procédés de la première catégorie comprennent tous les systèmes de halage funiculaire,

En novembre 1862, MM. Troll et Mercier, de Lyon, prennent le premier brevet pour *l'emploi au remorquage sur les voies navigables de moteurs fixes agissant sur câbles sans fin*. Viennent ensuite, en 1869, MM. Malezieux et Millerand.

Ces solutions, quoique très ingénieuses, n'ont plus qu'un intérêt historique.

En 1882, on voit apparaître un autre système dû à M. Rigoni qui, en 1885, au premier Congrès de navigation tenu à Bruxelles, fit un long exposé et fournit les plans de son « *système de traction par câble marcheur*. »

Il avait été expérimenté en 1882 déjà en Belgique sur le canal de jonction de la Meuse à l'Escaut; en 1884,

en France, sur le canal St-Martin. Le résultat de ces essais ne paraît pas avoir été satisfaisant.

En 1882, également, M. Oriolle présenta une demande de brevet pour un halage par corde sans fin sur les canaux et rivières canalisées.

Pas plus que son devancier, il n'avait empêché le déraillement du câble dans les courbes un peu prononcées.

Ce système avait été essayé à Tergnier sur le canal de St-Quentin.

Ce n'est qu'en 1889 que M. Oriolle aborda toutes les difficultés du problème. Des essais eurent lieu le 29 juillet 1889 devant le Congrès des eaux fluviales. Il n'a pas, depuis cette époque, fait l'objet d'une exploitation régulière. Le problème de la traction par câble des bateaux sur les canaux n'avait donc reçu que des solutions incomplètes.

C'est à M. Maurice Levy que revient l'honneur de l'avoir amené au degré de perfectionnement qu'il présente actuellement. Les premiers brevets datent d'octobre 1887 et les essais eurent lieu dès l'année suivante entre l'écluse de Gravelle et la sortie du souterrain de St-Maur, et furent successivement étendus à la traversée du souterrain, puis la section comprise entre l'entrée de celui-ci et le pont de Joinville. Ces trois circuits réunis en un seul, constituent le petit circuit de l'installation et a une longueur de 1 231 mètres. La 4^{me} partie, indépendante des trois autres, s'étend sur le canal de Saint-Maurice de l'écluse de Gravelle à celle de Charenton. Elle a une longueur de 3 445 mètres.

Il serait très intéressant de passer en revue l'histoire des tâtonnements de cette invention, mais cela nous forcerait de sortir des limites de cette étude. Voyons seulement quelles sont les difficultés techniques du problème

et comment le grand promoteur du halage funiculaire les a résolues. (*)

« 1^o Par suite de l'obliquité de leur tirage, les bateaux » tendent constamment à arracher le câble des poulies qui » le portent ou le dirigent. Il faut donc qu'il soit comme » emprisonné sur ces poulies.

» 2^o Chaque fois que la corde d'amarre arrive à une » poulie, elle s'engage dans sa gorge en même temps que » le câble. Tandis que celui-ci doit rester emprisonné » dans la gorge, l'amarre, au contraire, doit s'en échapper » spontanément. Il faut que l'issue offerte à l'amarre soit » interdite au câble. La nécessité de concilier ces deux » termes en apparence contradictoires du problème en » rend la solution particulièrement difficile, surtout dans » les courbes concaves.

» 3^o Le câble étant constamment en marche et à une » assez grande hauteur au-dessus du chemin de halage, il » est difficile d'y attacher la corde du bateau ; il faut que » le moyen d'attache soit robuste, rapide et à la portée » de tous les mariniers.

» 4^o Une fois l'attelage fait, il ne faut pas que le câble » entraîne immédiatement la corde et, par suite, le bateau. » Il faut que le marinier ait le temps de remonter tranquil- » lement à bord de son bateau et de partir quand il le » désire.

» 5^o Quand le départ commence, il faut qu'il soit pro- » gressif : c'est l'opération du démarrage.

» 6^o En route, il faut qu'à tout instant le marinier à bord » puisse, s'il le désire, suspendre la marche de son » bateau. »

Le câble métallique installé de chaque côté de la voie

(*) Le halage funiculaire de M. Maurice Levy.

navigable est soutenu de distance en distance par des poulies. Elles sont de deux espèces : les *poulies de support ordinaires* et les *poulies de changements de direction*.

Poulies de support. — La joue située du côté du canal est percée de plusieurs *crans* formés des deux parties symétriques de la développante du cercle, qui forme le fond de la gorge, comprises entre ce cercle et celui de pourtour de la poulie. L'arc, compris entre deux de ces crans, est divisé en un certain nombre de parties égales que l'on joint au centre de la circonférence, et, par chacun des sommets de ce polygone, on mène une perpendiculaire au rayon précédent et l'on découpe les petits segments compris entre la circonférence et ces deux perpendiculaires

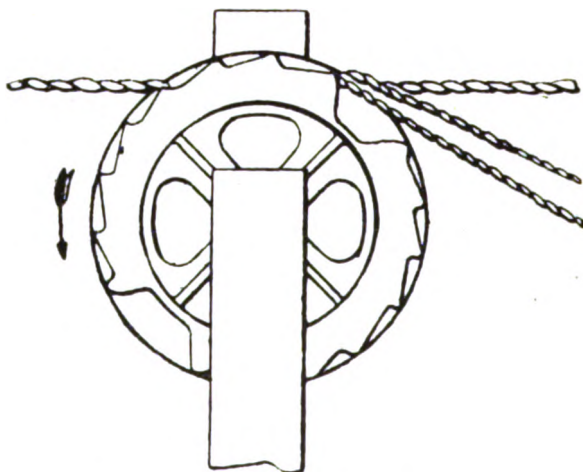


Fig. 1. — L'amarre prenant un cran.

Lorsque l'amarre se présente et qu'elle est molle, elle s'enroule sur la poulie et y reste engagée jusqu'à ce qu'un cran se présente ; elle pénètre dans l'ouverture et en

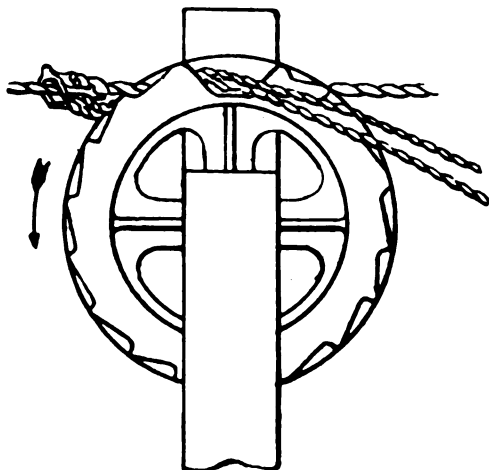


Fig. 2. — Cran au sommet.

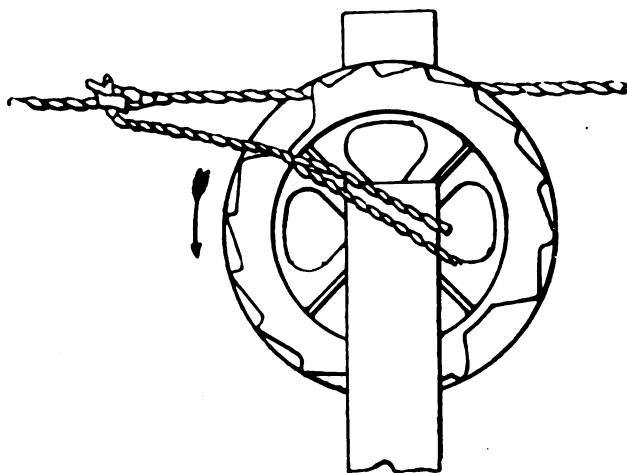


Fig. 3. — L'amarre quitte le cran.

Le diamètre des poulies varie de 0^m40 à 1^m00. La profondeur de la gorge varie de 0^m10 à 0^m20.

suit naturellement le pourtour puisque la développante de cercle est sa trajectoire naturelle. Quand l'amarre est tendue, elle pénètre immédiatement dans un des petits crans qu'elle suit jusqu'après son passage au sommet de la poulie (Fig. 1, 2, 3.)

Pour assurer le maintien du câble dans la gorge de la poulie on fixe au support un *fermoir* tangent au point culminant de la poulie (fig. 4). Il se compose d'un axe horizontal qui reçoit deux bras en forme de Δ terminé chacun par un rouleau qui vient s'appuyer sur le câble un peu en dehors de la poulie de support. L'un des deux bras est un

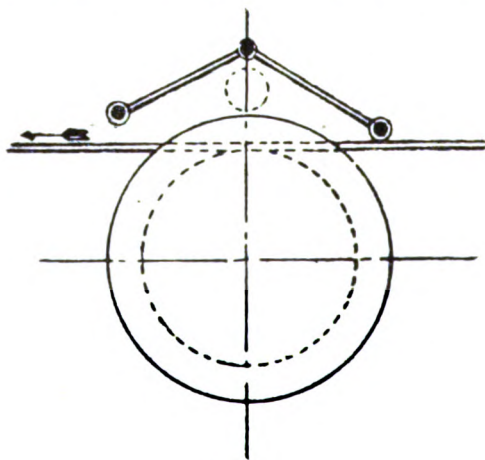


Fig. 4.

peu plus court que l'autre, ou si, ayant même longueur il fait avec la verticale un angle plus grand, on réalise un système tel que l'un des rouleaux appuie toujours sur le câble et le maintient en place, tandis que l'autre, devenu libre, livre passage aux cordes d'amarre.

Poulies de changement de direction. — Différents cas peuvent se présenter :

1^o *Angle convexe brusque.* — Le câble est guidé par une poulie horizontale ; passant devant la poulie , l'échappement de la corde d'amarre s'effectue sans la moindre difficulté.

Une telle poulie est soumise à deux forces : l'une horizontale provenant de la tension du fil ; l'autre verticale due aux poids des deux demi-travées adjacentes.

La première tend à déclaveter la poulie de son axe. La seconde tend à faire tourner la poulie gauche. Pour contrebalancer cette fatigue il convient de soutenir le câble de part et d'autre de la poulie par une poulie verticale placée à une dizaine de mètres du sommet de l'angle formé par les deux brins. Si cette solution présentait des difficultés, il conviendrait de réduire la longueur des deux travées.

2^o *Courbe convexe.* — Dans ce cas encore on se sert de poulies horizontales. La corde d'amarre tend, par sa traction sur le câble, à l'arracher de son support ; il convient donc, pour que la force qui les applique l'un sur l'autre soit la plus grande possible, de franchir les courbes convexes par des *sauts brusques*, c'est-à-dire par un petit nombre de déviations prononcées.

3^o *Angle concave brusque.* Quatre solutions sont applicables :

1^o Par une poulie horizontale *suspendue* à une console. La corde d'amarre s'échappe par *le dessous*, ce qui oblige à découper les crans dans la joue inférieure ;

2^o Par une poulie horizontale *supportée*. L'amarre est amenée à passer *par dessus* à l'aide d'une glissière disposée de façon qu'elle soit conduite un peu en contre haut de la poulie (fig. 5, 6, 7) ;

3^o Par une poulie inclinée munie d'ailes (fig. 8) ;

4^o Par un ensemble de 2 poulies verticales (fig. 9).

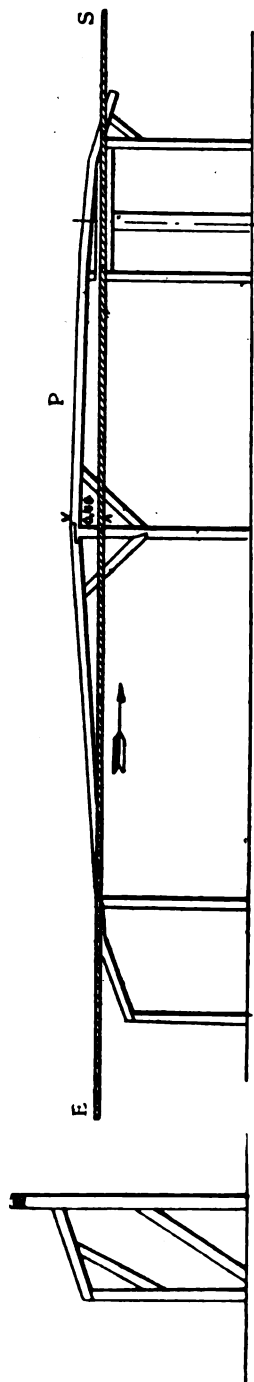


Fig. 5. — E : Entrée. — S : Sortie. — P : Pente de 0m05.

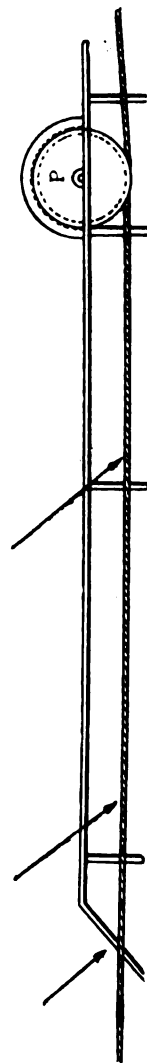


Fig. 6. — P : Poulie de 1m de diamètre. Longueur minimum 7 m.

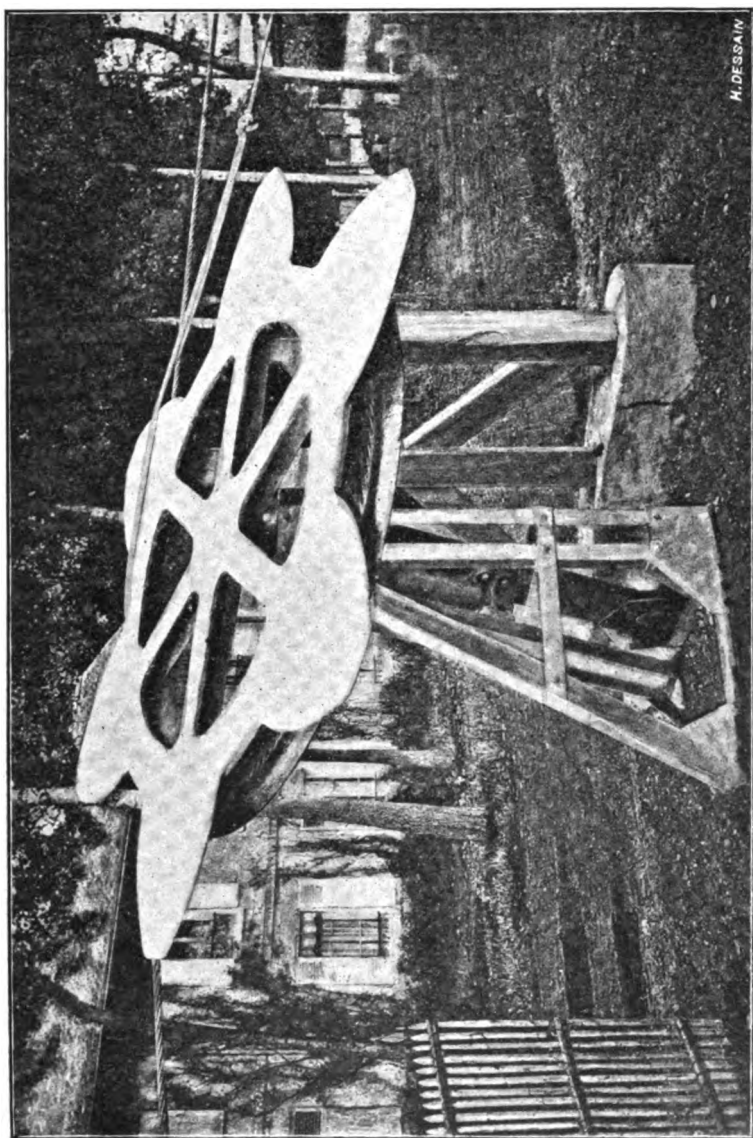


Fig. 8. — Poulie à ailes d'angle concave de 2^m de diamètre à fond de gorge.

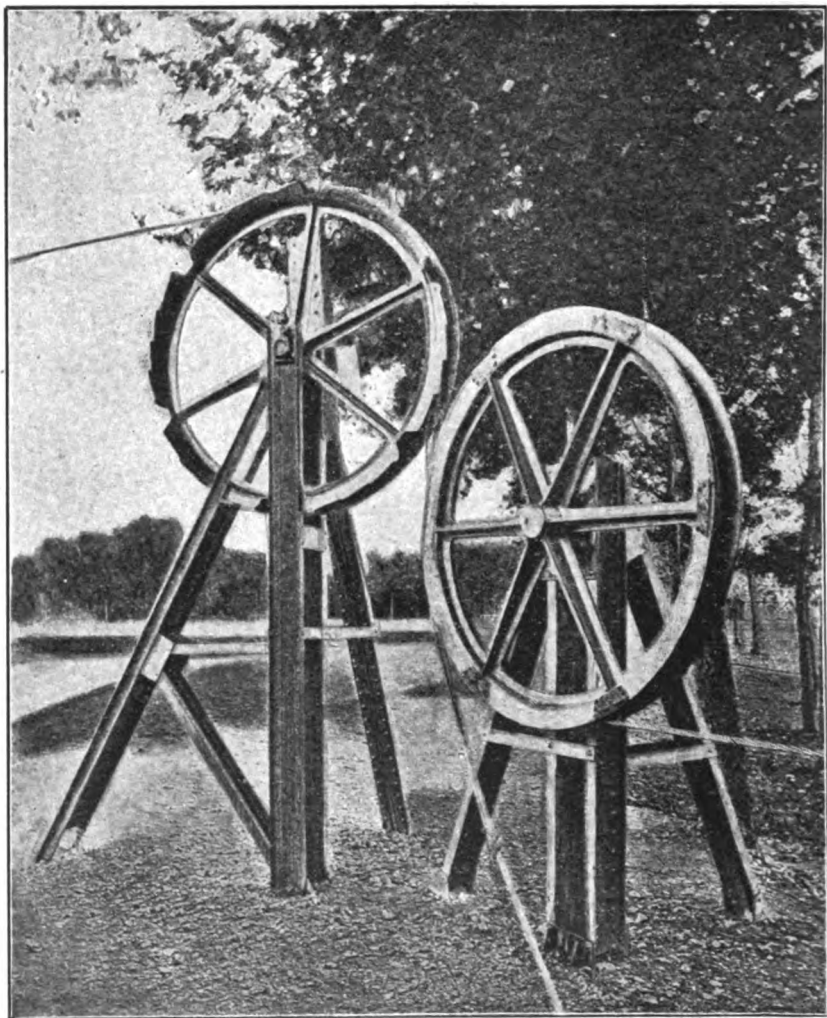


Fig 9 — Poulies doubles réalisant à la fois un changement d'altitude et de direction.

La première solution présente l'inconvénient d'exiger l'installation des poulies à environ 3 mètres au dessus du chemin de halage.

La seconde évite l'emploi du porte à faux et est la plus économique; la présence de la glissière qui s'étend à au moins 7 mètres est cependant une complication.

Le troisième système, appelé système des *roues à ailes*, se comprend aisément: l'amarre arrivant devant la poulie s'engage dans le premier cran qu'elle rencontre; celui-ci l'emmène et la force à franchir le point culminant de la poulie. Passé ce point, elle se dégage par son propre poids.

Ces poulies à crans prolongés sont un peu encombrantes et les ailes descendent trop près du sol. Elles exigent de plus une poulie verticale, dite *poulie d'abaissement*, pour racheter la différence d'inclinaison des deux brins. Cette solution est plus élégante que la précédente, mais absorbe aussi plus de force. La comparaison de ces deux systèmes, faite au circuit de Charenton, a montré que la deuxième solution absorbe 27 % en moins de résistance que la troisième.

Le quatrième procédé est trop coûteux et absorbe trop de force; il offre à lui seul une résistance égale à celle de 1 kilomètre d'installation en ligne droite. Il n'est à conseiller que pour changer à la fois de direction et d'altitude.

4° *Courbe concave*. Si la courbe est assez prononcée et qu'on peut réduire le contour polygonal extérieur à ses deux tangentes extrêmes, on emploie une des 4 solutions précédentes. Pour des déviations de 4 à 5 degrés au plus, on peut employer des poulies analogues à celles de support ordinaire; seulement leur axe est incliné d'environ 20° sur l'horizontale.

On est donc conduit par ce tracé à multiplier le nombre des angles en rive concave.

Changements d'altitude du câble. — Il y a 3 cas à considérer suivant qu'on se trouve : 1^o en ligne droite ; 2^o en angle convexe ; 3^o en angle concave

En ligne droite, on emploie 2 poulies verticales dont une d'abaissement.

En angle convexe, on emploie une poulie ordinaire, seulement son plan est incliné sur l'horizontale.

En angle concave, on peut employer la solution 4 du 3^o, mais l'inconvénient signalé subsiste ; de plus, l'installation est coûteuse.

L'emploi de roues inclinées à ailes présente de grands avantages, surtout que dans ce cas on peut supprimer la poulie d'abaissement. N'ayant aucun organe délicat, elles fonctionnent parfaitement.

Attelage de la corde d'amarre au câble. — Ce point, très important dans un système de traction par câble télé-dynamique présente des difficultés pratiques provenant du vrillage du câble haleur.

Celui-ci fait, en effet, un tour complet sur lui-même tous les 12 à 14 m, et cette rotation change de sens au passage de certains angles, ce qui fait que le câble se tord sur certaines de ses parties et se détord sur d'autres

L'attache doit donc se composer de 2 parties distinctes :

1^o Une première pièce fixement attachée au câble et qui, par suite, tourne avec lui dans le vrillage.

2^o Une autre pièce faisant anneau autour du câble et permettant à celui-ci de tourner facilement à l'intérieur sans l'entraîner.

Deux solutions distinctes peuvent être adoptées. La première consiste à placer à demeure sur le câble, des arrêts qui doivent être faciles à poser et à déplacer, sur lesquels on s'appuie pendant la traction et que l'on abandonne quand on veut s'arrêter. Cette solution, la seule qui ménage convenablement le câble offre encore l'avan-

tage d'assurer l'exploitation régulière de la voie navigable, quelle que soit l'intensité du trafic.

La seconde consiste à s'atteler au câble au moyen d'un appareil, pince ou mâchoire, qui fonctionne en même temps comme arrêt; elle dispense, il est vrai, d'attendre quelques secondes le passage d'un point d'attache, mais elle ne permet pas d'assurer une exploitation régulière et elle a l'énorme inconvénient de détruire très rapidement le câble.

Arrêts posés à demeure sur le câble. — En voici deux dispositions qui satisfont également à la condition citée plus haut et destinés à servir respectivement de point d'appui aux deux systèmes d'attelage : l'étrier et la manille.

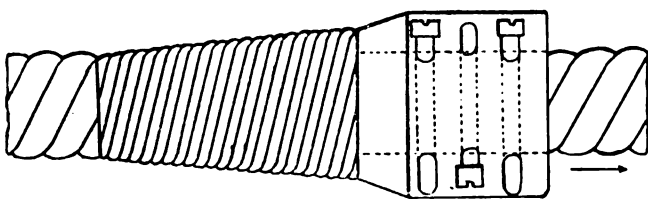


Fig. 10.

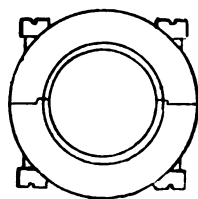


Fig. 11.

1^o Arrêt simple. Cet arrêt se compose (fig. 10 et 11) de deux demi-bagues en acier ou en bronze embrassant le câble et réunies par des vis, leur partie antérieure est terminée par deux demi-cuillers ou becs de très faible épaisseur, et sur lesquels tourne l'appareil d'attelage buté à l'arrière par la partie saillante de l'arrêt, ce dispositif des becs qui n'existait pas dans l'arrêt primitif a l'avantage de protéger complètement le câble et d'en assurer la conservation.

A l'arrière, ces bagues sont butées par un transfil de 0,10 m. de longueur qui empêche tout déplacement. Ce transfil est fait avec de la ficelle ou du caret posé en

couches régulières, avec interposition d'un mélange de résine ou de goudron.

2^o *Arrêts à deux talons*. — Les deux demi-bagues portent à chaque extrémité un renflement ou talon dans lequel sont logées les vis de serrage. L'appareil d'attelage se place généralement entre les deux talons où le câble est complètement protégé (fig. 12).

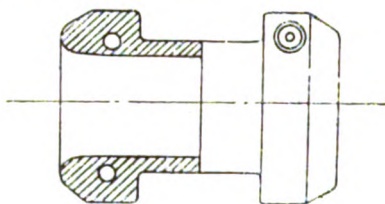


Fig. 12.

Système d'attelage. — Etrier. — Cet appareil se compose, en principe (fig. 13, 14, 15), d'un tube en acier *a* dans

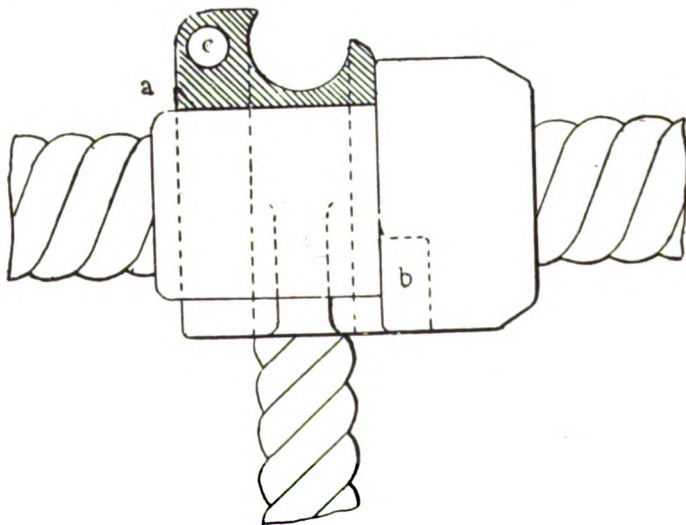


Fig. 13.

lequel passe la corde qui doit être réunie à l'amarre. Ce tube porte à l'arrière et à sa partie inférieure *b* deux petits talons qui viennent s'engager sous la saillie de l'arrêt en avant et, à sa partie supérieure, un anneau *c* pour y attacher la cordelette de déclanchement.

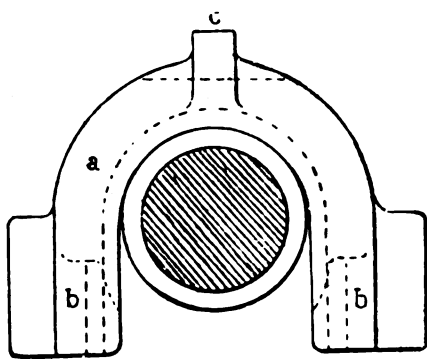


Fig. 14.

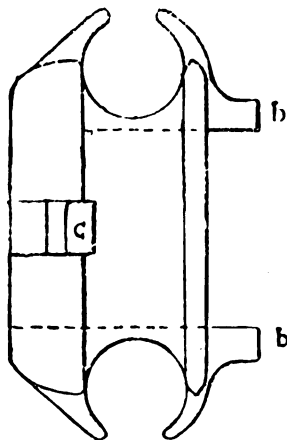


Fig. 15.

Pour atteler un bateau, on pose l'étrier sur le câble ; le système glisse ainsi jusqu'au passage d'un arrêt, contre lequel il vient se butter et qu'il ne peut plus abandonner. Si on mollit légèrement la corde d'amarre en agissant en même temps sur la cordelette de déclanchement, l'appareil tiré par la partie supérieure et antérieure bascule et échappe à l'arrêt ; le bateau est donc rendu libre jusqu'au passage du nouvel arrêt.

Le détachement sûr et sans effort de l'étrier du câble est réalisé par le dispositif suivant (fig. 16). Les bouts de la corde d'attelage passant sur l'étrier sont l'un court, terminé par une poire A, l'autre long, terminé par un nœud coulant B, c'est à cette extrémité qu'on attache la corde

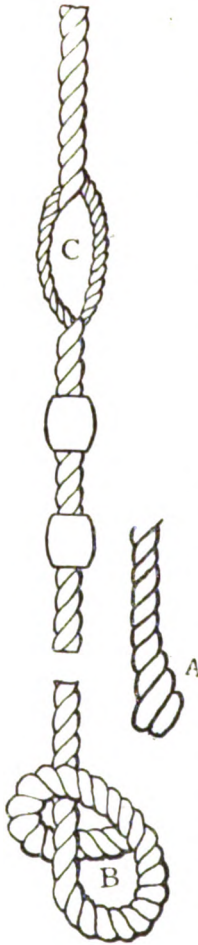


Fig. 16.

d'amarre ; quant à la poire qui termine le brin court, on la passe dans un œil C ménagé dans le brin long où elle pénètre et d'où elle puisse sortir librement.

Pour se détacher complètement du câble, il suffit de renverser l'étrier au moyen de la cordelle ; le câble, en appuyant sur le brin court au point de jonction avec le brin long, fait sortir la poire de l'œil.

Manille. — Ce système d'attelage est avantageux sur les voies navigables où l'on n'a pas à s'arrêter en cours de route ; il se compose essentiellement d'un anneau métallique *a* qui tourne autour du câble et porte à sa partie inférieure une manille *b* ou grande maille de fer mobile autour d'un axe horizontal.

La partie supérieure de l'anneau *a*, qui embrasse le câble, peut s'ouvrir ; elle est, en effet, reliée à la partie inférieure d'un côté par un axe *d* autour duquel elle s'ouvre, de l'autre par un crochet *e* dont les déplacements sont limités par un petit ressort *g* et un ergot *h* (fig. 17, 18, 19).

Le déclanchement peut se faire par un système analogue au précédent.

Pinces. — Quoique ces appareils ne soient pas à conseiller et qu'ils présentent indépendamment des inconvénients signalés plus haut celui d'offrir des dangers pour

un trafic un peu important, nous donnerons cependant la description d'un système.

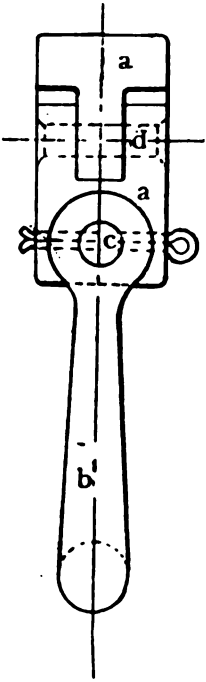


Fig. 17.

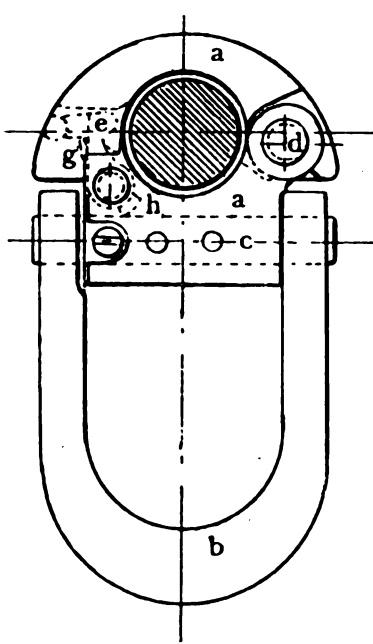


Fig. 18.

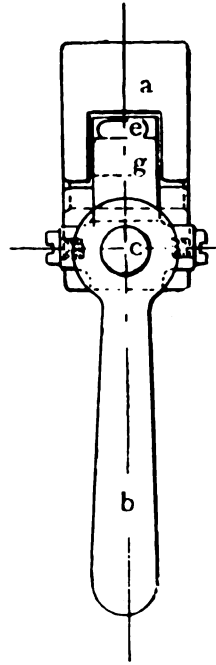


Fig. 19.

Pince à coins (fig. 20, 21) — Elle se compose de deux demi-cuillers *a* dont la partie antérieure cylindrique est suivie d'une partie légèrement conique sur laquelle on pose un anneau à charnière *b* fermé par une goupille *c*. Cet anneau est lui-même légèrement conique. En avant de l'anneau on ferme, sur la partie cylindrique des cuillers, une manivelle (à tabatière) ordinaire, à laquelle on attache le câble d'amarre; cette manille bute naturellement sur l'anneau et tend à le coincer sur le cône formé par les deux demi-manchons qui embrassent le câble.

Pour déserrer la pince et lui permettre de glisser sur le câble, on agit, au moyen d'une cordelle, sur une petite bague à section rectangulaire d placée entre l'anneau et les talons d'arrière; cette bague, dont la partie supérieure est horizontale, agit à la façon d'un levier et sépare l'anneau des manchons; aussitôt que le serrage est détruit, la

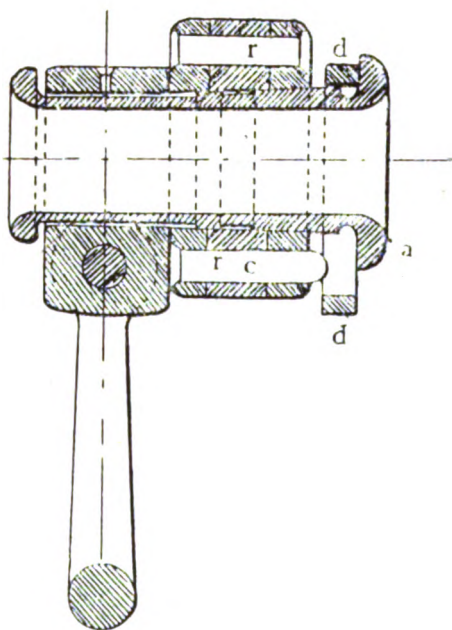


Fig. 20.

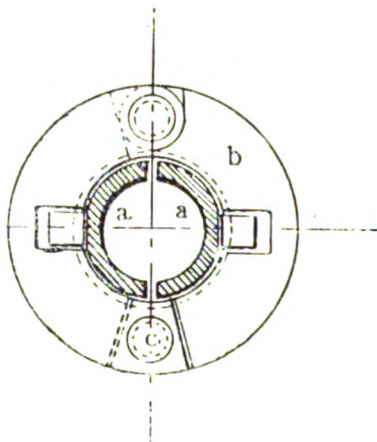


Fig. 21.

pincé devient libre et glisse facilement sur le câble. Pour empêcher les déplacements relatifs des demi-cuillers dans le sens du mouvement du câble, il suffit de les réunir par un ressort r logé dans une petite rainure qui ne fait pas obstacle au fonctionnement du système tel que nous venons de le décrire.

Appareil de démarrage. — Une installation de halage funiculaire ne doit pas rendre obligatoire l'emploi d'appareils de démarrage. Dans certains cas cependant, ces appareils rendent de réels services ; mais leur conception doit être simple et leur fonctionnement automatique. Le démarreur à levier est celui qui semble le mieux remplir ces conditions.

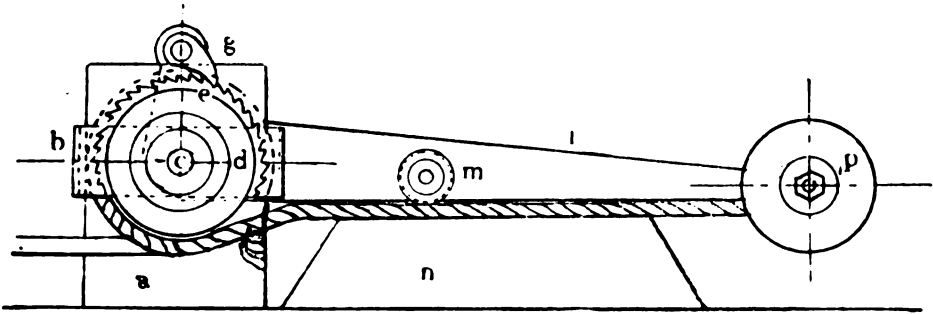


Fig. 22.

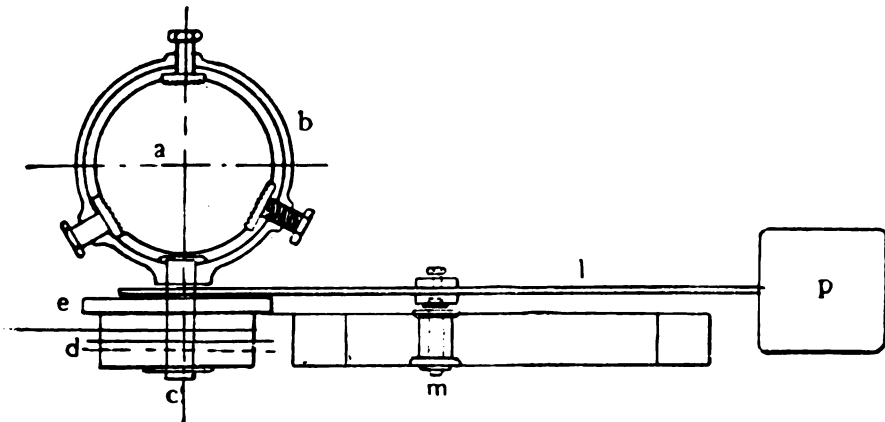


Fig. 23.

Démarrage à levier (fig. 22, 23). — On fixe à une des bittes *a* du bateau, au moyen de trois vis de pression, un collier *b*

en fer portant un axe c sur lequel tourne un cylindre en bois d rendu solidaire au moyen d'une roue à rochet e et d'un cliquet g , d'un levier l qui porte un contre poids p et un rouleau m , que l'on peut déplacer sur le levier et l'y fixer en un point convenablement choisi au moyen d'une vis de serrage.

Pour démarrer, on enroule la corde d'amarre sur le tambour d et on la fait passer ensuite sur le rouleau m et un bloc de bois n sur lequel elle se trouve pressée. On comprend qu'il soit possible de disposer l'appareil en plaçant convenablement le rouleau m de manière à exercer sur la corde d'amarre un effort déterminé fixé à l'avance. Si cet effort est inférieur à l'effort de démarrage et supérieur à l'effort de traction du bateau en marche normale, l'appareil assurera automatiquement le démarrage car, dès que l'effort dépassera la limite fixée, le levier se soulèvera légèrement et permettra à la corde de glisser; le bateau passera ainsi sans secousse et sans à coup du repos à la vitesse normale.

La roue à rochet et le cliquet permettent, d'ailleurs, au marinier de rendre le tambour d indépendant du levier l et, par suite, de laisser filer la corde à volonté.

Avant de passer à quelques considérations d'ordre général, relatives au halage par câble téléodynamique, disons un mot du système d'entraînement et du système de réglage.

Système d'entraînement. — En un point convenablement choisi, le câble passe sur deux poulies de deux mètres de diamètre à fond de gorge, installées sur un solide bâti en maçonnerie. La première de ces poulies est folle sur son axe et n'est, à proprement parler, qu'une poulie de direction qui oblige le câble à s'enrouler presque complètement sur la seconde, dite *poulie motrice*. Cette dernière

Ensemble de la station centrale des canaux de Saint-Maur
et de Saint-Maurice.

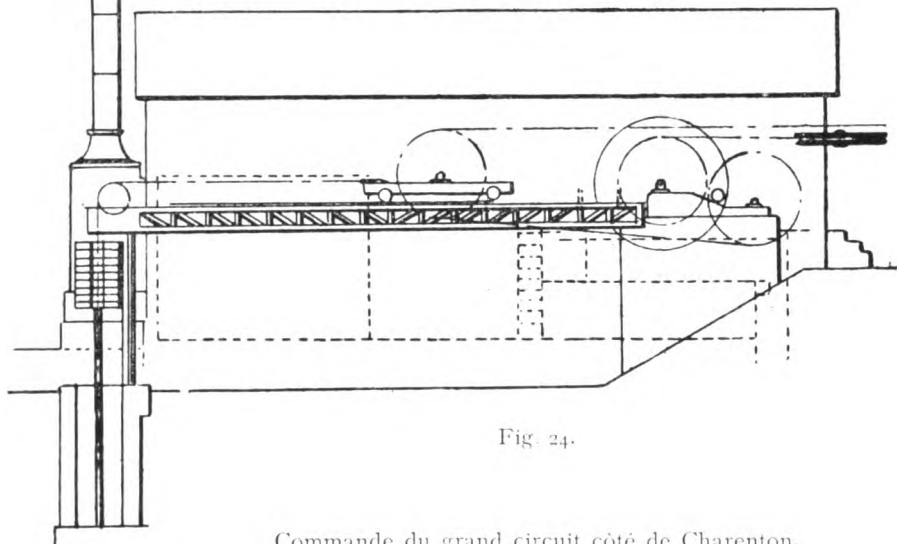
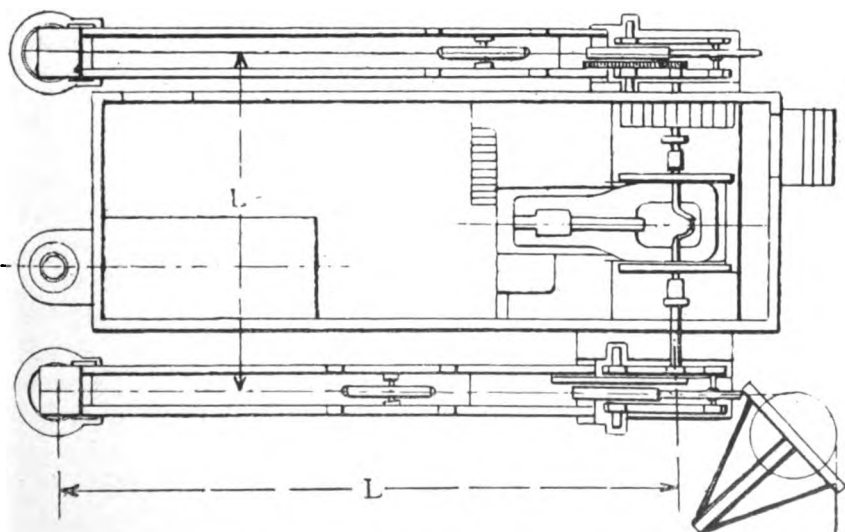


Fig. 24.

Commande du grand circuit côté de Charenton.



Commande du petit circuit côté de Joinville.

Fig 25. — $L = 14^m50.$

$L' = 7^m80.$

dont la gorge est garnie de bois, de manière à augmenter le frottement et, par suite, l'adhérence du câble, est calée sur une roue d'engrenage qui reçoit son mouvement d'un pignon directement actionné par le moteur (fig. 24, 25).

Câble. — Dans une telle installation, le mouvement ne peut jamais devenir permanent par suite des efforts transversaux qui tendent à imprimer au câble des oscillations verticales et horizontales.

Cet inconvénient peut néanmoins être atténué dans une large proportion en donnant au câble une tension initiale suffisante. Celle-ci a été posée à 15 kil par mm² de section métallique utile, soit 5 000 kil. pour le câble employé. Elle présente un grand avantage au point de vue des démarrages.

Supposons une péniche de 300 tonnes, demandant un effort de traction d'environ 100 kil., pour une vitesse de marche de 0^m75 et une longueur de corde qu'on lâche de 15 mètres, la force nécessaire pour démarrer sera d'environ 550 kil. La flèche produite sera donc très faible, vu que cette force est le dixième environ de la tension initiale.

Le câble passe ensuite sur une troisième poulie de deux mètres de diamètre à fond de gorge, portée par un chariot mobile muni d'un contre-poids qui sert à le tendre plus uniformément.

La position la plus avantageuse du tendeur est près de la machine motrice en lui donnant un poids double de celui de la tension initiale du câble.

Deux cas peuvent alors se présenter : le tendeur se trouve dans la deuxième ou dans l'avant-dernière travée.

La différence de tension nécessaire pour mettre le câble en mouvement est donc limitée dans le premier cas par la condition de ne pas augmenter outre mesure la fatigue du métal, car les tensions vont en croissant à partir de la

tension initiale; dans le deuxième cas, par la nécessité de réduire la tension dans une proportion assez importante pour que les flèches puissent prendre une importance exagérée, car dans ce cas les tensions vont en décroissant à partir de la tension initiale.

Il ne conviendrait pas, dans le premier cas, de leur laisser dépasser $\frac{1}{6}$ de la charge de rupture des fils fixée à 150 kil., soit 25 kil. par mm^2 de section métallique utile, soit 8 500 kil. pour la tension totale, valeur qu'il est bon en pratique de réduire à 7 500 kil. correspondant à 22,5 kil. par mm^2 de section utile, pour tenir compte des effets d'incurvation.

Dans le deuxième cas, la tension initiale pourrait être portée jusque 6,000 kil. afin de réduire la flèche des travées à tension réduite.

Si la différence de tension totale n'était pas suffisante, on pourrait l'augmenter en plaçant un tendeur en un point intermédiaire posé au milieu du circuit. Le poids à lui donner sera égal à celui du premier, diminué d'autant de fois la résistance moyenne des poulies qu'il y aurait de travées entre eux.

En prenant une différence de tension motrice de 2 400 kil., voyons alors quelle est la longueur maxima du circuit que l'on peut adopter.

Il a été établi : 1° que la résistance du circuit pendant la marche à vide est donnée par la formule

$$190 + 85 L$$

L étant la longueur du canal exprimée en kilom.

2° Que la tension perdue par kilom. de canal, due à la traction des bateaux est sensiblement égale à 28 γ , γ désignant le nombre de millions de tonnes parcourant annuellement la section.

Nous avons donc

$$2\,400 = 190 + L(85 + 28\mu)$$

d'où

$$L = \frac{2210}{85 + 28\mu}$$

pour $\mu = 1$ $L = 19,5$ kilom.

$\mu = 2$ $L = 15,7$ kilom.

$\mu = 3$ $L = 13,1$ kilom.

$\mu = 4$ $L = 11,2$ kilom.

L'espace des machines étant double de la longueur des circuits, nous voyons que pour les trafics considérés nous arriverions en effet sur des distances de 39, 31, 26 et 22 kilom.

Voyons maintenant, pour la tension fixée plus haut, le travail que doit développer la machine motrice. Celle-ci actionnant deux circuits accolés, la force se répartit à peu près également entre eux.

Occupons-nous donc momentanément d'un seul.

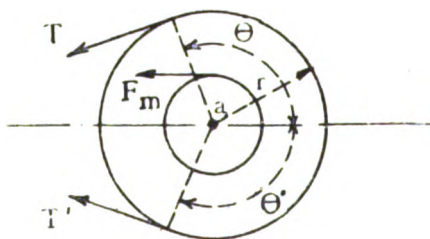


Fig. 26.

Soit la poulie motrice représentée ci-contre (fig. 26) ayant un poids π en tenant compte des deux demi travées du câble qui lui sont limitrophes.

On a, en écrivant que le travail moteur, pendant un tour, est égal au travail résistant, supposant la manivelle à double action et divisant par 2 -,

$$(T' - T) r + 4 \frac{F_m a}{2 \pi} - \sin \varphi \rho$$

$$\sqrt{(T \sin \theta + T' \sin \theta' \pm F_m)^2 + (T' \cos \theta' - T \cos \theta + \pi)^2} = 0,$$

équation qui donne aisément la force motrice en négligeant le terme F_m sous le radical.

Le travail en chevaux-vapeur étant

$$\frac{4 F_m a V}{2 \pi r \times 75 \eta}$$

sera donc donné par

$$\frac{V}{75 \eta} \left[T - T' + \frac{\rho \sin \varphi}{2 \pi r} \sqrt{(T \sin \theta + T' \sin \theta')^2 + (T \cos \theta - T' \cos \theta' + \pi)^2} \right]$$

η étant le rendement de la machine. (*)

Par ce qui précède, il sera donc aisé, pour une installation donnée, de déterminer la longueur des circuits, d'où l'espacement des machines motrices. Les circonstances locales permettront alors de fixer l'emplacement exact des appareils moteurs et celui des tendeurs.

(*) Pour les données suivantes : $T = 7\,500$; $T' = 5\,100$; $\theta = 90^\circ$; $\theta' = 160^\circ$; $a = 0{,}35$; $r = 1$ et $\pi = 2\,475$, $\eta = 75\,0\%$, le travail mesuré à l'indicateur serait de 31 chevaux. Soit, en chiffres ronds, 60 chevaux pour les deux circuits.

Cela fait, on passera au tracé du circuit. Le principe fondamental que l'on ne doit jamais perdre de vue dans cette opération est que le plan des deux brins d'un câble tangents à une poulie doit coïncider mathématiquement avec le plan moyen.

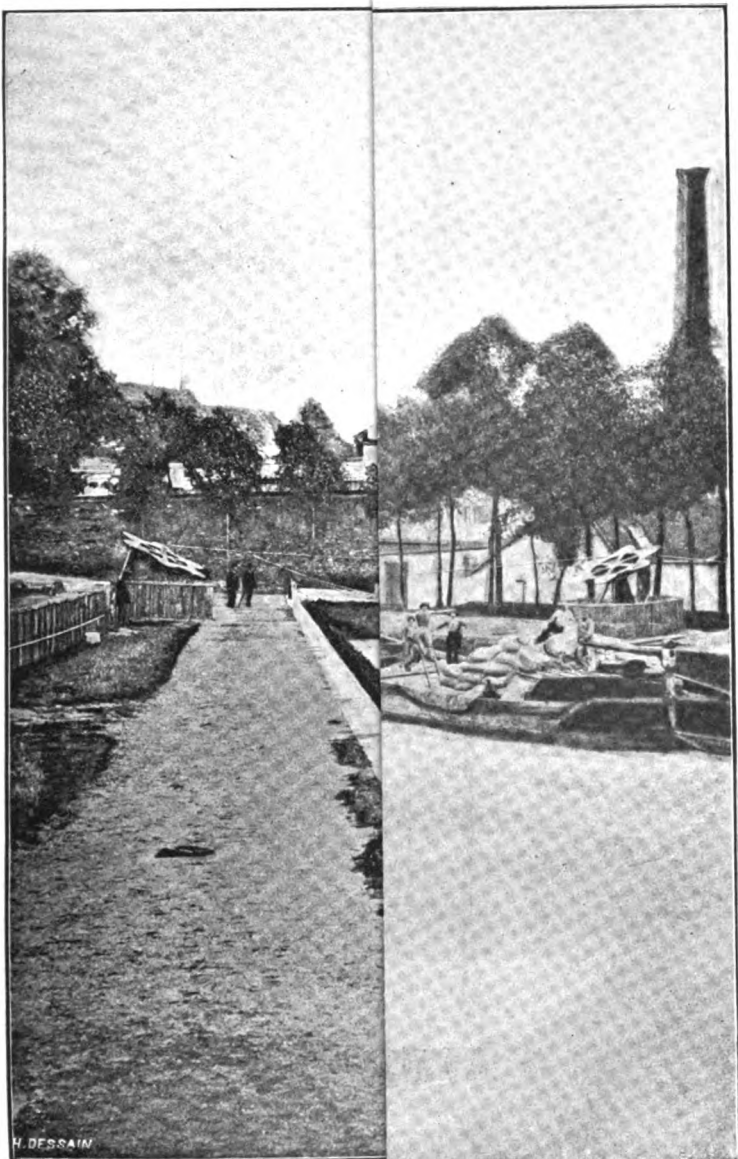
L'espacement des poulies ne doit, en général, pas dépasser 60 à 70 mètres. Toutes les travées doivent, autant que possible, être égales entre elles, sauf à raccourcir, s'il est nécessaire, les travées extrêmes de chaque alignement droit, ainsi que celles situées à l'entrée et à la sortie des écluses où une longueur réduite est préférable. Il en est de même des travées adjacentes à un angle convexe brusque; elles ne doivent généralement pas dépasser 30 à 40 mètres.

Pour des travées inclinées réunissant des paliers successifs, la pente ne devra jamais dépasser 0,15 m par mètre. Au passage d'une écluse avec pont sur les murs de fuite, il faudrait cependant abaisser brusquement le câble à l'entrée amont du pont.

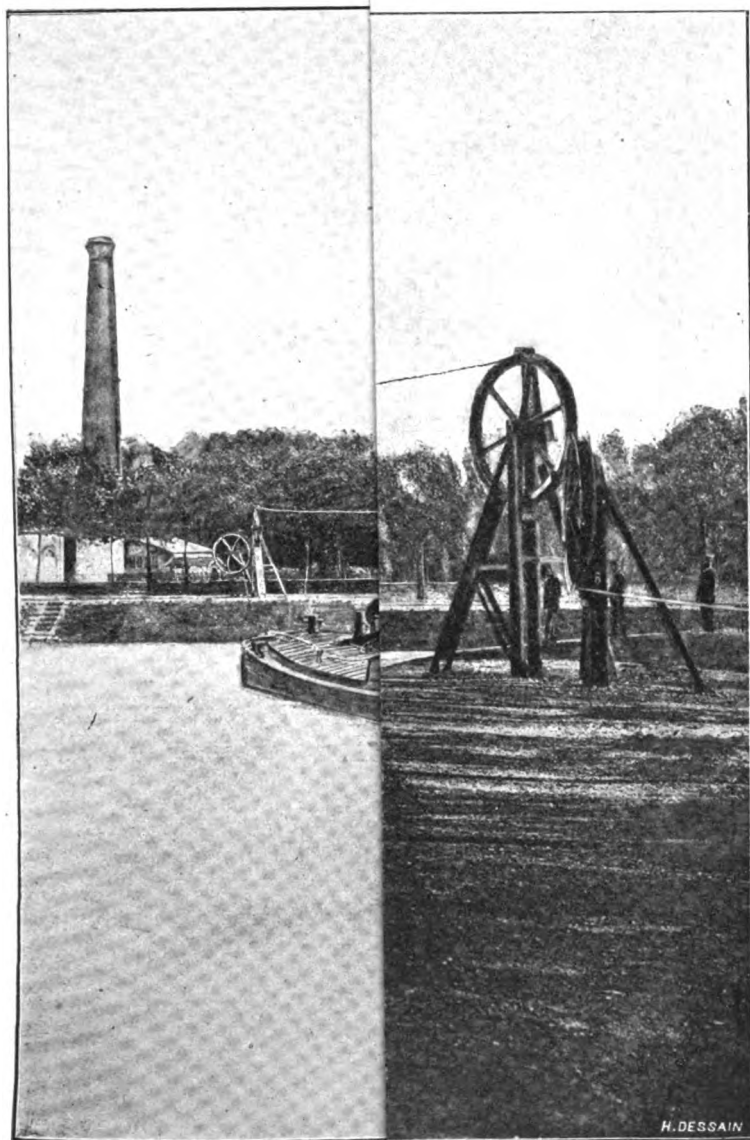
Les considérations dans lesquelles nous sommes entrés, lors de la description des appareils, nous dispense d'insister davantage sur ce sujet.

L'installation des canaux de St-Maur et de St-Maurice, dont nous venons de donner les grandes lignes, fonctionne dans de très bonnes conditions, malgré toutes les difficultés qui s'y trouvent réunies : Un port de 250 mètres de longueur à Charenton, l'écluse de Gravelle précédée d'un pont et d'un coude, la traversée, par une travée de 121 mètres de portée, de la branche du canal de St-Maur formant descente en Marne; un tunnel de 600 mètres de long, le coude brusque réunissant les deux canaux.

Les fig. 27, 28 représentent ces deux derniers points dangereux; elles montrent aussi clairement le mode d'attache du bateau.



H. DESSAIN



Le succès de ce procédé décida le gouvernement français à l'installer, en 1894-95, au souterrain du Mont-de-Billy, dans le bief de partage du canal de l'Aisne à la Marne. Ce souterrain a une longueur de 2 300 mètres et est fréquenté par des péniches de 240 à 300 tonnes. Le câble en fils d'acier a un diamètre de 0^m03 et une longueur de 2 600 mètres; ses deux brins sont disposés l'un au-dessus de l'autre sur la même rive. Le tendeur formé d'une poulie de 2 mètres est sollicité par un poids de 10 tonnes. Les poulies de support ont 0^m50 de diamètre à fond de gorge, les poulies de changement de direction ont des diamètres variant de 0^m80 à 1^m66. L'attelage se fait à l'aide d'étriers venant butter contre des arrêts fixés sur le câble.

L'exploitation se fait par convois à des vitesses variant de 1,1 à 1,25 kilomètre à l'heure. Le passage dans un même sens se compose de 8 à 9 bateaux répartis en 4 convois distants de 120 mètres.

Les dépenses totales d'établissement se sont élevées à 130 110 francs; les dépenses d'exploitation ont été, en 1897, de 15 000 francs pour un trafic de 1 500 000 tonnes, soit 1 centime par tonne, pour la traversée complète du souterrain.

2^e catégorie. — Les procédés de la 2^e catégorie n'eurent au début aucun succès; une première tentative avait été faite à l'aide d'une locomotive roulant sur la berge des canaux de Neuf-Fossé, d'Air et de la Deule, entre la Fontinettes et Douai, sur une longueur de 77 kilom. avec une seule écluse.

La voie ferrée était ballastée sur une longueur de 2 mètres et sur une épaisseur de 0^m30. Les rails, du poids de 15 kilogrammes par mètre courant, étaient posés, à l'espacement de 1 mètre, sur des traverses en bois de 1^m70 de longueur.

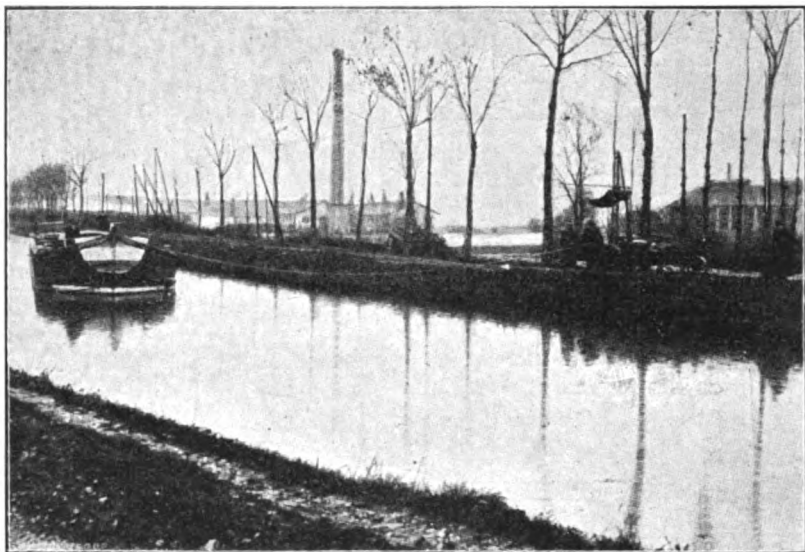


Fig. 29. — Cheval électrique halant une péniche

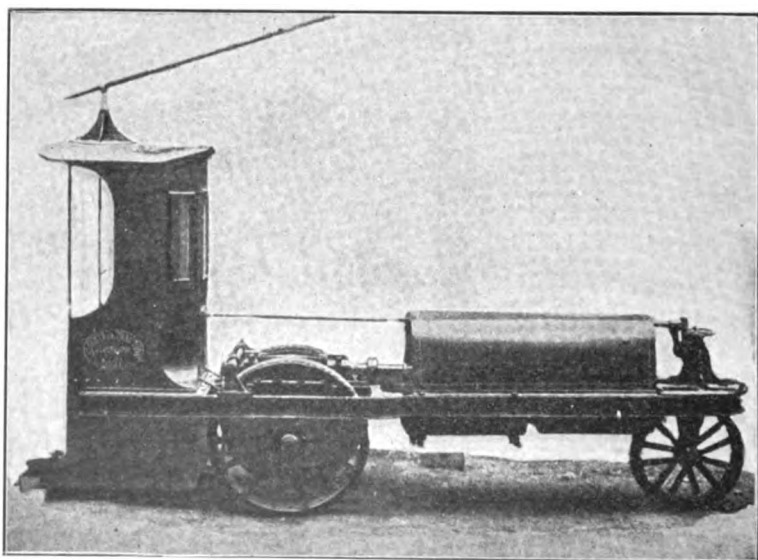


Fig. 30. — Vue du cheval électrique.

Les machines en service étaient des locomotives-tenders à 4 roues couplées : elles pesaient chacune 11 tonnes à vide et 14 tonnes à charge.

La traction ne s'opérait guère qu'à la rencontre ; chaque train remorqué comprenait en général deux ou trois bateaux à pleine charge ; la vitesse de marche était de 1 500 mètres à l'heure.

Ce service ne put résister à la double concurrence du halage aux longs jours et du service de touage du canal de la Deule. Il fut abandonné le 1^{er} février 1886.

La première cause de cet insuccès était le coût de l'établissement d'une voie ferrée ; en second lieu l'utilisation de machines lourdes propres à donner de la vitesse alors qu'il n'en faut pas.

C'est en 1892 que le problème trouva sa vraie solution par l'emploi de la force électrique.

Ce fut M. Galliot qui en fut le promoteur. Il indiqua le principe de son appareil au Congrès de 1894, et des essais eurent lieu en 1895 et 1896 sur le canal de Bourgogne

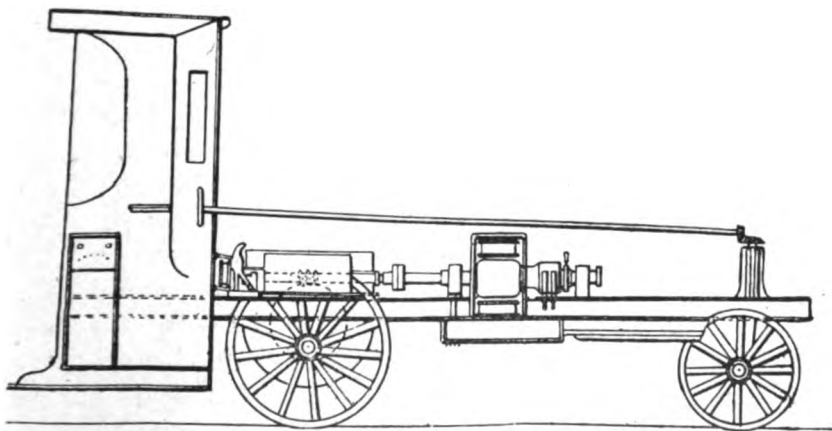


Fig. 31. — Coupe longitudinale. — Échelle 1/45.

(fig. 29). La Société Denève et Cie, qui exploite ses brevets, lui a donné la forme ci-contre (fig. 30, 31, 32) (*) Il est

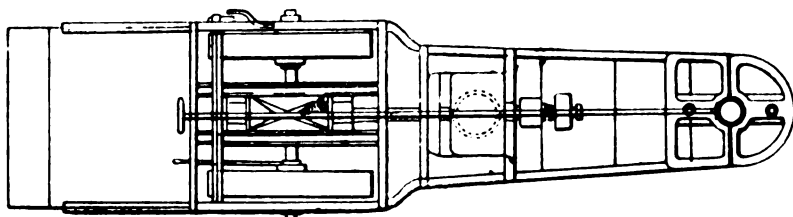


Fig 32. — Plan. — Échelle 1/5.

une sorte de tricycle à roues de 0,15 m de longueur, circulant sur la berge et relié par un trolley à la ligne aérienne qui suit toutes les sinuosités du cours d'eau. Le câble de halage est fixé à l'arrière, entre les roues motrices; à l'avant, la roue directrice de moindre diamètre est encastree dans le chariot horizontal, en forme Σ , qui porte la dynamo réceptrice. Celle-ci est bipolaire, induit à anneau, inducteur en série et peut absorber jusque 6 kw. L'arbre du moteur, dirigé dans le sens de l'axe du tricycle, donne le mouvement, par une vis sans fin en bronze, à une roue dentée faisant corps avec l'axe des roues motrices, ces dernières sont en fer, et les jantes sont revêtues extérieurement de cordes en fibres d'aloës, ce qui donne à l'ensemble une certaine élasticité et augmente l'adhérence. En arrière des roues, le châssis porte une cabine en tôle destinée à abriter le conducteur et les appareils de conduite et de direction. Le devant de la cabine est fermé par un vitrage. Le conducteur a devant lui un volant au moyen duquel il commande la roue directrice, par l'intermédiaire d'un arbre horizontal qui se prolonge jusqu'à

(*) *L'Industrie électrique.*

l'avant de la voiture et d'un engrenage conique(*). A gauche se trouve le tableau de distribution, disposé verticalement et comprenant un commutateur principal qui commande la marche en avant, en arrière, le ralentissement, l'accélération ou l'arrêt, un parafoudre et deux tiges de prise de courant sur lesquelles se fixent à frottement dur les douilles cylindriques en laiton qui forment l'extrémité des fils communiquant aux fils de ligne. Un frein à pédale et un dispositif spécial permettant le déclenchement de la corde de halage, au cas où le bateau tirerait le cheval vers la lunette du canal, complètent le mécanisme.

Son poids total est de deux tonnes.

Un troisième procédé est dû à M. Lamb Il consiste dans l'emploi de moteurs électriques circulant sur câbles et halant les bateaux comme dans le système précédent. (fig. 32a, 32b, 32c) (**).

Sur la rive est installé un fort câble porteur A, sur une série de poteaux. Le long de ce câble se meut un chariot M, auquel est suspendu l'électromoteur F; celui-ci commande la poulie R par l'intermédiaire d'une vis sans fin. Le câble de traction Z est enroulé une seule fois autour de cette poulie, de sorte que quand l'électromoteur se met en mouvement, le chariot circule sur le câble porteur et hale le bateau par le câble de traction S. L'attache C aux poteaux est isolée du support D; de même, la suspension de l'appareil moteur est isolée, de sorte que le câble porteur et celui de traction peuvent directement servir au transport du courant. L'électromoteur et le mécanisme à vis sont renfermés dans une boîte. La vis

(*) Dans les derniers appareils, le pignon a été remplacé par une vis sans fin, afin d'avoir une transmission moins sensible.

(**) Nous extrayons la description de cet appareil d'un rapport de M. l'ingénieur Gröhe.

sans fin fonctionne dans un bain d'huile, de sorte que le travail absorbé par le frottement est très faible, et le mé-

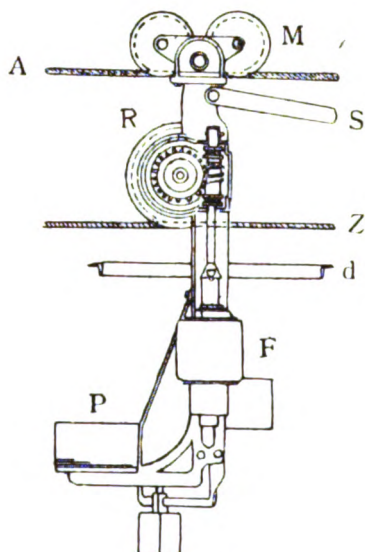


Fig. 32a.

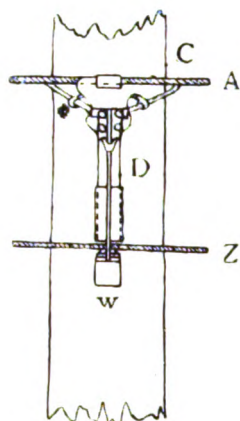


Fig. 32b.

canisme est à l'abri de l'humidité et de la poussière. La cornière D sert à éviter le contact avec le poteau qui

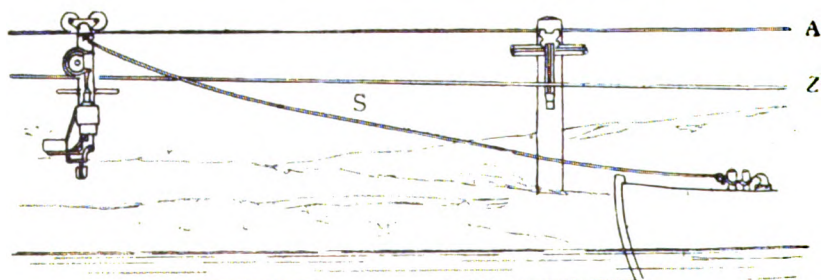


Fig. 32c.

pourrait résulter des oscillations du chariot, tandis que la roulette W sur le poteau maintient l'appareil moteur à distance.

Le câble d'amarre porte des fils conducteurs, qui sont en communication avec une boîte à résistances et un commutateur placés à bord. Au lieu d'installer la boîte à résistances et le commutateur à bord, on peut les fixer au moteur; dans ce cas un conducteur prend place sur le siège P.

3^e catégorie. — M. Busser propose, en 1893, au Congrès de navigation intérieure, tenu à Chicago, le système suivant. Il distribue le courant le long du canal et à l'aide d'un moteur placé dans une petite barque située à la partie supérieure du gouvernail, il actionne une petite hélice à rotation rapide logée dans une fenêtre ménagée dans la paroi du gouvernail. Le mouvement est transmis par une chaîne (fig. 33).

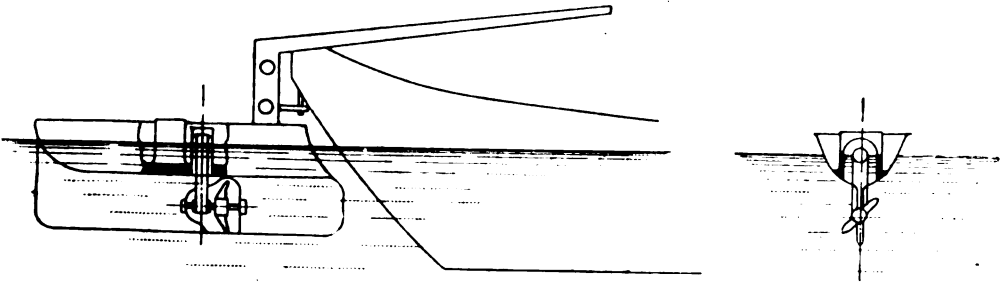


Fig. 33.

M. Gaillot proposait, au Congrès de La Haye, une solution analogue (fig. 34). Un électro-moteur attaque par une tige munie d'un pignon conique, une roue dentée calée sur l'arbre de l'hélice. Ce pignon et cette roue tournent dans une boîte à l'huile hermétique.

Sur toute sa hauteur, la tige verticale est enveloppée

d'un double fourreau formant l'axe creux du gouvernail.

La Société Denèsle place le moteur dans une caisse en tôle à fermeture étanche, de 0^m50 de largeur sur 1^m80 de

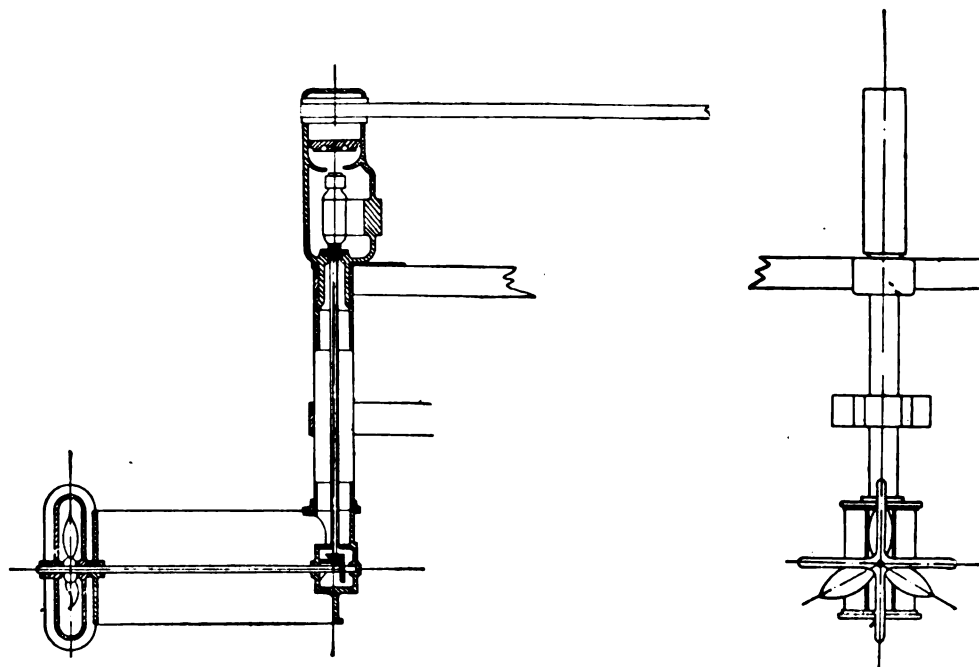


Fig. 34

longueur et 1^m40 de haut, effilée dans sa partie postérieure pour permettre l'admission facile de l'eau sur l'hélice qui, également, est enclavée dans le gouvernail. Les fils d'admission de courant sortent de la caisse à sa partie supérieure et servent à commander, depuis la barre, la marche de l'hélice. Celle-ci est en bronze à trois branches, elle a un diamètre de 0^m95 et un pas de 0^m40 et fait, en marche normale, 300 tours par minute.

Tout l'appareil pèse environ 900 kil. Il flotte à cote fixe,

de façon que l'hélice fonctionne à une profondeur constante (fig. 35*a* et 35*b*).

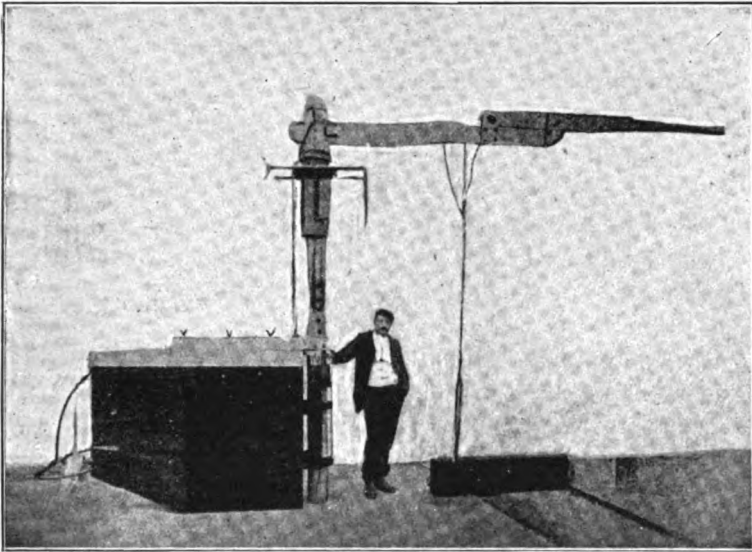


Fig. 35*a*. — Vue du gouvernail propulseur.

Dans ces systèmes, la traversée du canal se fait en substituant au gouvernail ordinaire des bateaux un gouvernail ainsi armé.

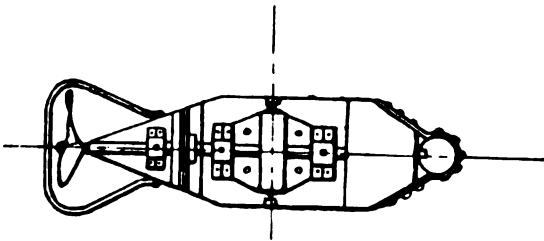


Fig. 35*b*. — Plan.

Cette substitution demande à peine quelques minutes. Le bateau muni du gouvernail propulseur est dirigé avec la plus grande facilité et se laisse gouverner plus docilement que s'il continuait à obéir à son propre gouvernail.

C'est aussi sur l'emploi de l'hélice, actionnée électriquement, que s'est portée l'attention de certains ingénieurs américains, et il semblerait que le but poursuivi soit de doter les bateaux porteurs d'une hélice et d'une dynamo installées à demeure, prêtes à servir partout où se trouvera sur le chemin une distribution de courant.

Cette disposition du moteur à bord ne semble pas heureuse. En effet, s'il a la puissance nécessaire pour la navigation en canal, il sera totalement insuffisant une fois l'embarcation arrivée en rivière; dans le cas contraire, il serait inutilement trop puissant tant qu'il ne faudrait que circuler dans les canaux.

Travaillant dans un tout autre ordre d'idées, M. Bouquié voulait transformer chaque bateau de canal en toueur.

Son appareil moteur était installé sur un châssis transversal à l'avant du bateau et disposé de manière à pouvoir être enlevé au moyen d'une grue. Il se composait d'une locomobile activant, par l'intermédiaire d'une courroie et de différents trains d'engrenages, une poulie toueuse à empreintes. Des galets verticaux et horizontaux servaient à guider la chaîne à son entrée. Ce procédé, essayé en 1861 sur le canal de St-Denis, sur l'Oise et sur le canal de St-Quentin et en 1866 sur le bief de partage du canal de Charleroi à Bruxelles, fut favorablement accueilli par une Commission d'ingénieurs français et belges. Il ne put être mis en exploitation pour des raisons financières. Ce système présentait de véritables défauts.

1^o L'emploi de la poulie à empreintes qui n'est vraiment pratique qu'avec une chaîne calibrée alors qu'il est

impossible de conserver l'égalité de pas d'une chaîne de touage.

2^o La complication du système moteur qui exige l'embarquement et le débarquement de deux appareils distincts dont l'un, la locomobile, est très lourd.

3^o Le prix élevé non seulement des appareils, mais de l'exploitation, à raison de la grande consommation de charbon des petits moteurs à vapeur et de la nécessité d'avoir à bord, outre le marinier, un homme pour la conduite des machines.

L'idée de M. Bouquié était bonne, les moyens pour la réaliser défectueux; aussi voit-on, au 5^{me} Congrès de navigation intérieure tenu à Paris en 1892, reparaitre deux projets partant du même principe.

L'un de M. Busser, d'Oderberg-en-Marche, donnant les plans et calculs d'un système de touage électrique sur le canal de Hohensaaten à Spandau; l'autre, de MM. Molinos et de Bovet

Dans le premier, l'organe principal du touage est simplement, comme l'appelle son auteur, une « poulie à chaîne ». Cette dernière n'était autre que la roue à empreintes de M. Bouquié.

L'organe destiné à l'actionner est un moteur électrique monté sur un châssis comme le représente les fig. 36, 37.

Le bâti ainsi fixé sur l'avant du bateau, porte un moteur M qui, par une série de roues d'engrenages n , n_1 , n_2 , n_3 , actionne l'arbre principal p sur lequel est calée la roue à chaîne r . Des galets sont du reste placés en avant et au-dessous de cette roue pour guider la chaîne. A l'arrivée, celle-ci passe d'abord sur le galet horizontal g , puis entre les deux galets verticaux u et v . Le galet g repose avec son axe sur les paliers t et t_1 reliés au bâti a de la machine et les galets u et v tournent autour d'axes supportés par des appendices a_1 et v_1 venus également de

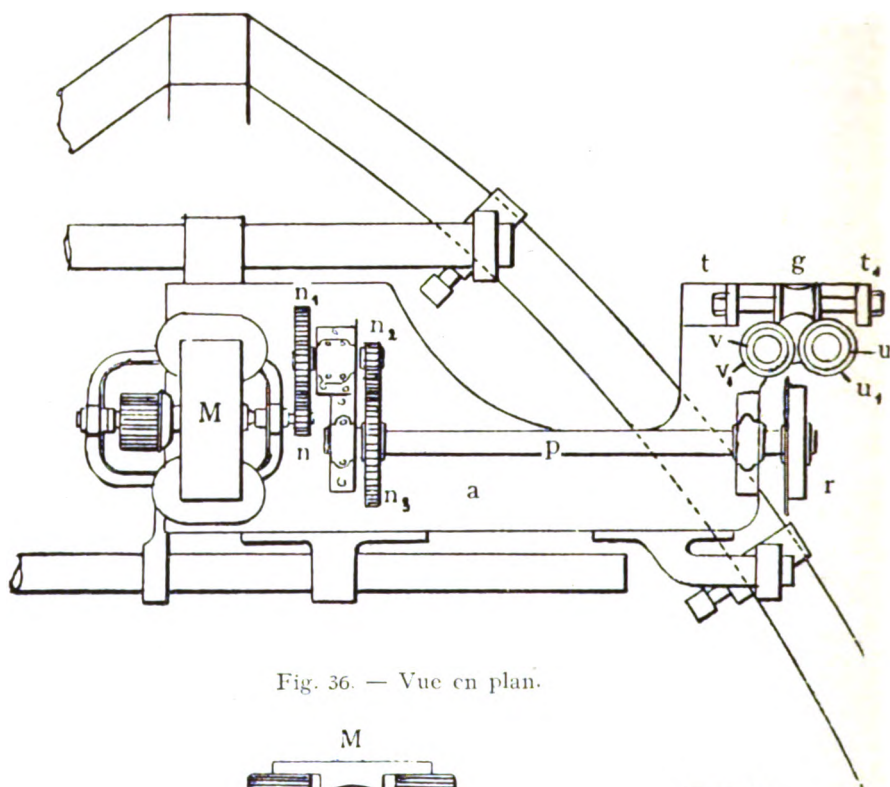


Fig. 36. — Vue en plan.

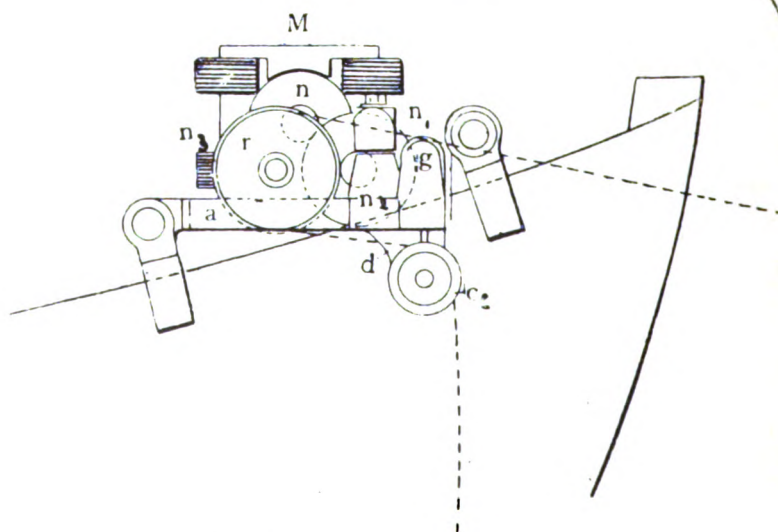


Fig. 37. — Vue en élévation

fonte avec le bâti. La partie supérieure du galet *u* est arrondie et l'écrou qui fixe ce galet sur l'axe est noyé, de manière à ne pas gêner le passage de la chaîne.

Après son passage sur la roue *r*, la chaîne revient sur le galet *c* dont l'axe *c*₁ est également fixé au bâti par l'intermédiaire d'un appendice *d* venu de fonte avec celui-ci.

Le tout peut coulisser sur le châssis de façon que la poulie qui fait saillie en dehors du bateau puisse être rentrée toutes les fois que cette saillie peut causer une gêne ou un danger au passage des écluses.

Le moteur est alimenté par une ligne aérienne installée le long des berges; la prise de courant doit être faite au moyen d'un chariot roulant sur la ligne.

Le mémoire de M. Busser est muet, relativement au retour du courant; il indique seulement que l'énergie électrique sera produite à haute tension par des stations centrales desservant des sous-stations de transformation, alimentant la ligne en courant d'une tension d'environ 500 volts.

L'amélioration de ce système, relativement à celui de M. Bouquié, est considérable; il supprime le salaire du mécanicien, toutes les manœuvres pouvant être faites par le marinier. Il conserve néanmoins les inconvénients de la poulie à empreintes.

Le système de MM. Molinos et de Bovet se compose également d'un appareil de touage mu par l'électricité. Le retour de courant devait se faire par la chaîne de touage. Cette chaîne devait être double et traverser les écluses par dessus les portes. Cette dernière disposition devait être modifiée.

Au Congrès de La Haye, les promoteurs du système déclarèrent, en effet, que la chaîne devait être interrompue aux écluses et que la traversée de celle-ci devait être assurée par des moyens spéciaux.

Ce qui caractérise particulièrement ce système, c'est la substitution d'une poulie aimantée à la poulie à empreintes.

MM. Molinos et de Bovet voient, dans l'emploi de cette poulie, un double avantage :

- 1^o De ne pas nécessiter l'emploi d'une chaîne calibrée ;
- 2^o De permettre un glissement possible de la chaîne devant des efforts anormaux, condition des plus avantageuses au point de vue des accidents et des démarrages (*).

Dans l'essai de ce système qui eut lieu sur le canal de St-Denis, une ligne de distribution se trouvait de chaque côté du canal ; sur les bords de celui-ci étaient mouillées 2 chaînes de touage devant assurer le retour du courant.

Le courant était pris par un chariot roulant sur la ligne et amené au bateau par un fil flexible. Les péniches devaient s'atteler à la chaîne de droite, les appareils devaient y être placés aux plats bords en avant des greniers et la poulie de touage faire saillie à tribord (fig. 38). Ils sont enfermés dans une boîte en tôle hors de laquelle fait saillie la poulie aimantée et les galets guides (fig. 39).

Le moteur transmet son mouvement par friction à un pignon qui par une roue dentée fait tourner la poulie de touage (fig. 40 et 41). La première de ses transmissions est réalisée au moyen d'une poulie aimantée montée sur l'arbre de la dynamo et tangente intérieurement au tambour qu'elle doit conduire. Le moteur est monté sur un ressort dont la tension peut se régler au moyen d'un levier. Une vis sert à faire coulisser toute la boîte sur son support pour rentrer la poulie au passage des écluses et la sortir ensuite. Un galet en fonte guide la chaîne à sa

(*) Le touage électro-magnétique de M. de Bovet.

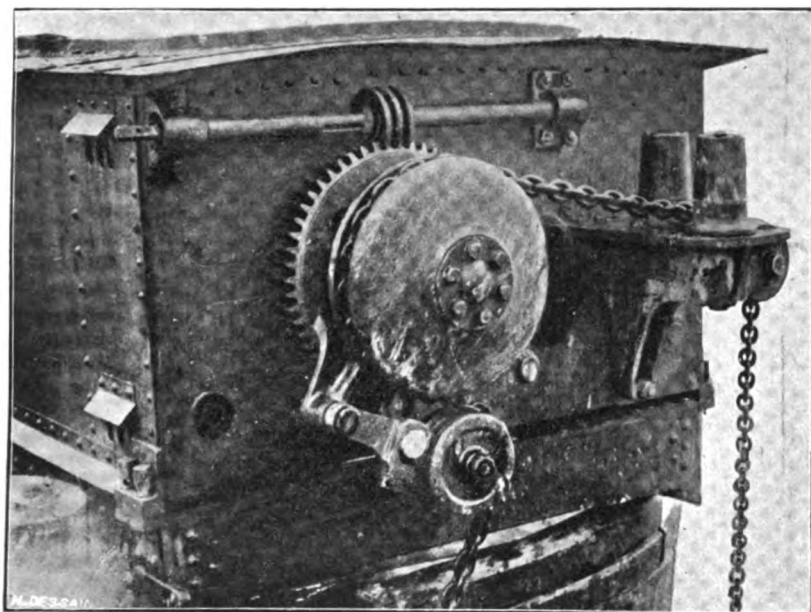


Fig. 38. — Vue extérieure de l'appareil de Bovet.

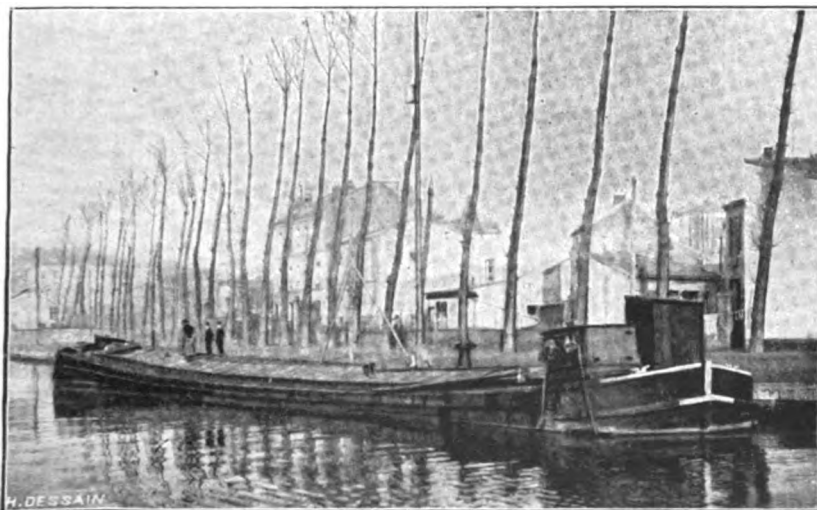


Fig. 39. — Appareil de Bovet installé sur une péniche

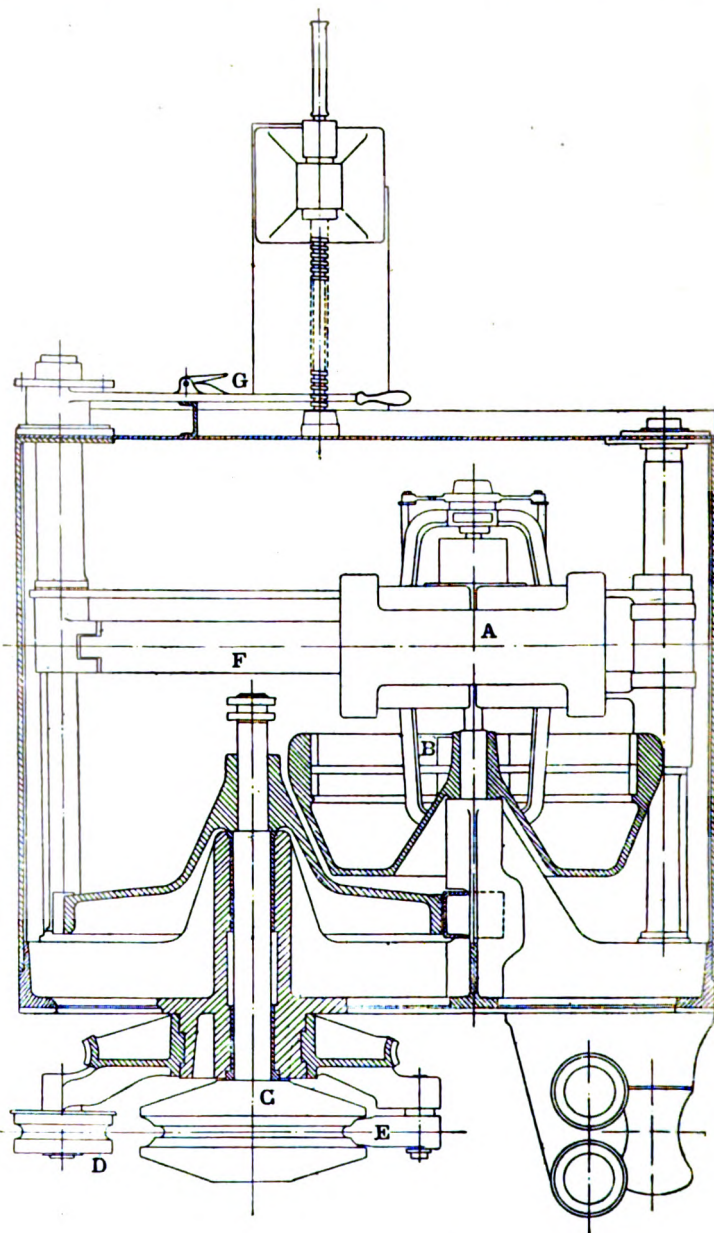


Fig. 40. — Vue en plan. — Échelle 1/15.

sortie et un doigt en métal anti-magnétique assurero son décollement ; le galet et le doigt sont montés ensemble sur un support solide de la roue dentée ; commandée par la vis sans fin, celle-ci permet de régler l'arc embrassé par la poulie de touage, lequel peut ainsi aller jusqu'à $\frac{3}{4}$ de tour en ordre de marche et être réduit à rien quand il faut jeter la chaîne ou la remettre en place

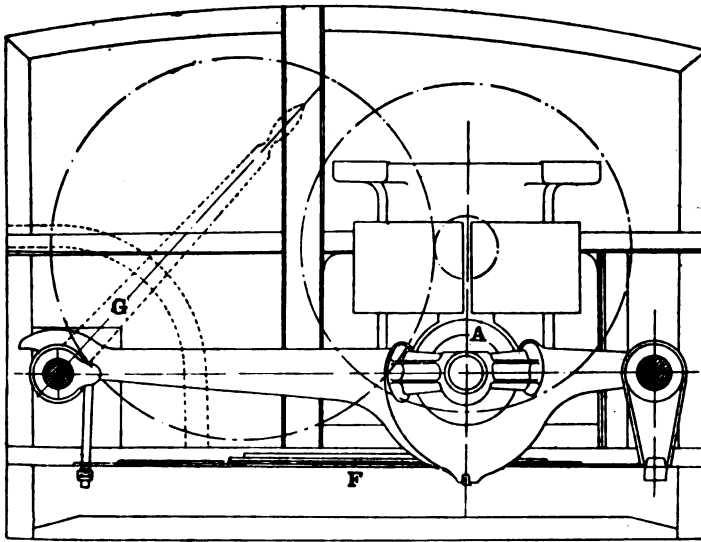


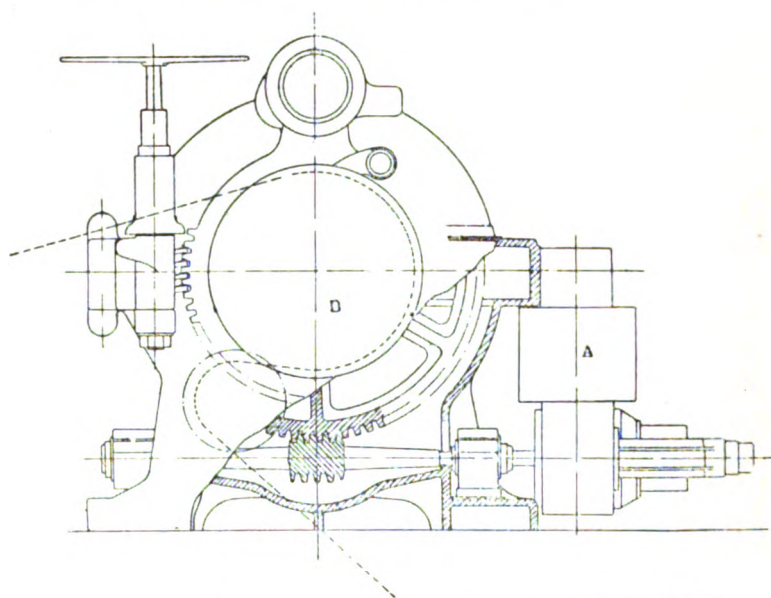
Fig. 41. — Coupe transversale. — Échelle 1/15.

- A. — Électromoteur.
- B. — Poulie d'entraînement.
- C. — Id. de touage.
- D. — Galet guide.
- E. — Doigt de décollement.
- F. — Ressort de suspension.
- G. — Levier de réglage.

Les bobines magnétisantes des poulies d'entraînement et de touage étaient en tension.

Ce premier essai montra à M. de Bovet que son appareil présentait des inconvénients : 1^o poids exagéré ; 2^o un mécanisme trop compliqué qui, malgré les avantages réels qu'il présentait, ne pouvait convenir. Il faut, en effet, avant tout, mettre entre les mains des marinières des appareils simples et robustes ne demandant aucun soin et aucune connaissance spéciale. Il pensa donc qu'il valait mieux transmettre le mouvement à la poulie de touage au moyen d'une seule roue dentée et d'une vis sans fin, fonctionnant dans un bain d'huile (fig. 42-43).

Son poids n'est plus que de 700 à 800 k^{os}.



1/2 élévation.

1/2 coupe longitudinale.

Fig. 42. — Échelle 1/15.

Poulie de touage. — Le principe consiste à placer la chaîne au contact de deux pôles d'aimant très voisins de façon qu'elle puisse fermer le circuit magnétique développé par le passage du courant de la bobine magnétisante.

La gorge est faite de façon que les anneaux de la chaîne s'y emboîtent avec le moins de jeu possible. Le courant est amené à la bobine par le centre de l'arbre, de deux bagues sur lesquelles frottent deux balais. La gorge est

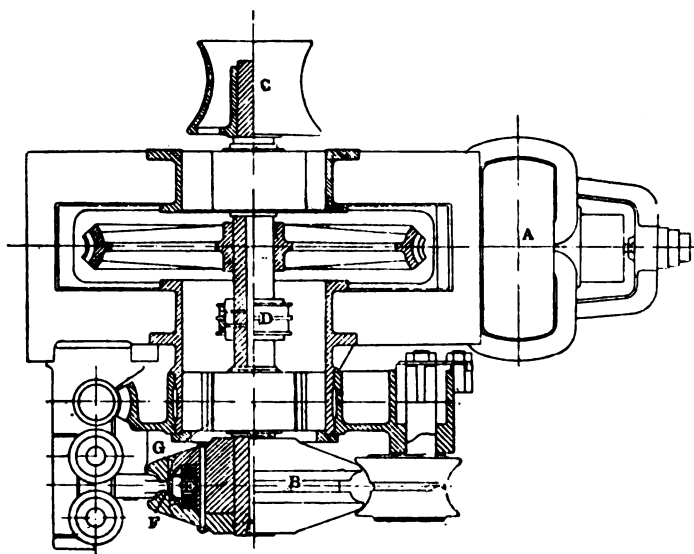


Fig. 43. — Coupe horizontale. — Echelle 1/15.

- A. — Électromoteur.
- B. — Poulie de touage.
- C. — Id. id. dans les écluses.
- D. — Prise de courant de la poulie de touage.
- E. — Bobine magnétisante.
- F. — Cercle de fermeture.
- G. — Rondelles en caoutchouc.

fermée par un anneau en bronze avec joints en caoutchouc pour préserver le fil. La fig. 42 montre le détail de la poulie. Avec une chaîne de 14 mm. pesant 5 k^{os} le mètre et un enroulement de 180°, la poulie de touage a pu supporter

un poids de 500 k^{os} pour un courant de 2 ampères. La bobine magnétisante avait 2 450 spires et une résistance

1/2 élévation.

1/2 coupe longitudinale.

Coupe transversale.

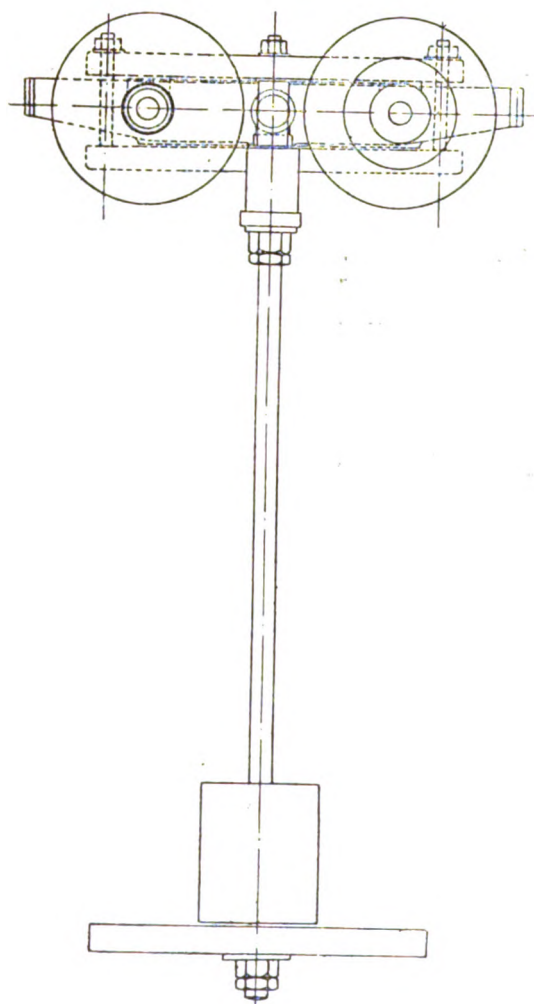


Fig. 44.

Echelle 1/5.

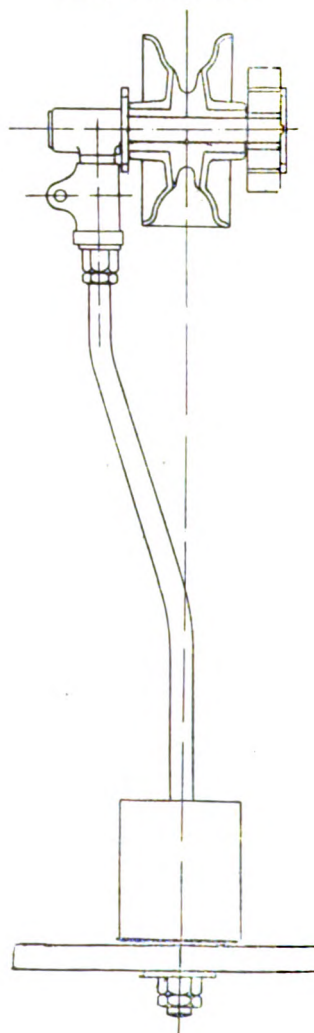


Fig. 45.

de 30 ohms. Comme on le voit l'adhérence pouvait être considérablement augmentée

Prise de courant. — Le courant était pris par un chariot roulant sur la ligne. Il se composait essentiellement (fig 44-45) d'un cadre, d'un contrepoids et de deux roulettes dont les gorges sont dessinées de façon qu'elles puissent passer sur les têtes d'isolateurs sans cesser d'être au contact du fil. Les roulettes sont établies avec un système de frein intérieur destiné à empêcher le chariot de filer vivement en avant dans les parties de la ligne qui sont en pente, ce qui doit arriver inévitablement à l'arrivée sous un pont. Le bateau marchant, le chariot est entraîné par le cable conducteur souple, qui, par l'intermédiaire du mât, le relie à l'appareil de touage.

Aux expériences précitées, il a été reconnu que le retour du courant par la chaîne n'était pas pratique. Cette dernière, en effet, reposant dans la vase du fond du canal, avait une résistance électrique énorme

Il fallut donc installer une deuxième ligne aérienne sur les poteaux qui portaient la première; on ajouta un deuxième chariot disposé de façon à être tiré ou poussé

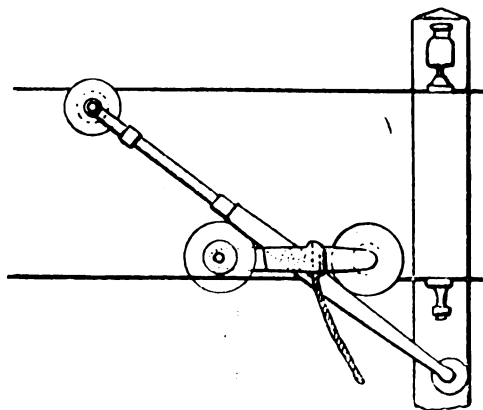


Fig. 46.

par le premier. En service normal, M. de Bovet propose le dispositif représenté fig. 46. Il se compose d'un chariot analogue au précédent portant un petit mât de trolley, tendant à se redresser par l'action d'un contre-poids ou d'un ressort, et dont la roulette porte sur la ligne supérieure

Passage aux écluses. — La traversée des écluses présente une certaine difficulté par suite de la présence des chaînes de touage. Si elles sont ininterrompues, il faut qu'elles passent en-dessous ou au-dessus des portes. Ces deux solutions présentent des inconvénients.

La première oblige à faire une ouverture dans le bas des portes, ce qui peut occasionner une perte d'eau considérable pour certains canaux à point de partage.

La deuxième provoque de sérieuses difficultés pour la manœuvre des portes. De plus, l'effort à développer lors de l'entrée du bateau dans le sas est beaucoup plus grand que celui en plein bief : l'appareil toueur devrait donc être beaucoup plus puissant. Cela présenterait deux inconvénients : 1^o de l'alourdir, 2^o de lui donner en marche normale un très mauvais rendement, puisqu'il n'utiliserait qu'une faible partie de sa puissance.

Deux solutions particulières sont possibles :

Première solution (fig. 47). — La chaîne des bateaux montants sera solidement attachée en *a* ; de l'autre côté de l'écluse, elle sera simplement tenue en *b*. Pour les bateaux avalants, la chaîne sera encore amarrée en *a'*, un stoppeur *b'* tiendra le bout libre de l'autre côté.

En un point B, convenablement choisi, se trouve installé un treuil électrique, alimenté par la ligne, suffisamment puissant pour faire entrer à bonne vitesse le bateau dans le sas. La poulée du treuil sera folle sur son axe à frottement très libre, relié au mécanisme de transmission de mouvement par un embrayage magnétique.

On voit donc que, tant que le moteur électrique tournera, le câble s'enroulera; quand il sera arrêté, on pourra le dérouler aisément en tirant sur l'extrémité libre. Deux poulies de renvoi m et n sont placées aux deux extrémités du sas.

Supposons donc un bateau montant; le marinier commence par jeter sa chaîne à l'eau, puis les éclusiers lui lanceront l'extrémité du câble passé sur la poulie n qu'il attachera à un des tabrins d'avant. Aussitôt les portes ouvertes, il entrera dans le sas par traction de ce câble.

Pour l'entrée dans le bief supérieur, le câble du treuil aura été fixé à un des tabrins d'arrière; une légère impulsion suffira à lancer le bateau. Le marinier n'aura plus qu'à replacer la chaîne de fond sur son appareil de touage.

Deuxième solution (fig. 48) — La chaîne des bateaux montants sera encore fixée en a . De l'autre côté, la chaîne viendra passer en b sur une petite poulie portée au haut du busc de la porte d'écluse, puis aboutira à un point fixe c . Cette chaîne se continue par un câble d un peu plus grand que la longueur du sas.

Un bateau montant, arrivant devant l'écluse, jettera encore sa chaîne et le marinier fixera sur la poupee de son appareil de touage l'extrémité du câble d qui lui a été lancé par les éclusiers.

Aussitôt les portes d'aval ouvertes, il met son appareil de touage en marche. La poupee ayant un diamètre moitié moindre que la poulie de touage, l'effort pourra donc être plus que doublé si la vitesse est de moins de moitié.

Pendant l'éclusage, le marinier détachera la corde d , il rétablira la chaîne sur sa poulie et se trouvera prêt à partir avec son appareil de touage lors de l'ouverture des portes d'amont. Le bateau sorti du sas, les éclusiers rétabliront la chaîne sur la poulie b .

Les manœuvres à exécuter par les bateaux avalants sont identiques.

Ce second moyen est plus simple d'installation que le premier. Cela pourrait, dans certains cas, être une raison pour qu'il soit préféré. Le premier procédé paraît, par contre, devoir donner plus de rapidité aux manœuvres.

ÉTABLISSEMENT D'UN PROJET.

La première chose à envisager est le nombre de bateaux passant journallement dans la section considérée. Si l'on possède sur le trafic de la voie navigable des données statistiques, il sera aisé de connaître le nombre de bateaux passant dans chaque écluse, tant à la remonte qu'à la descente. Connaissant le nombre d'heures pendant lesquelles la navigation est possible, on saura l'intervalle qui existe entre eux, d'où la vitesse de marche.

Mais si l'on ne possède pas de renseignements aussi précis, deux chiffres qu'il est aisé de se procurer c'est le trafic total annuel de la section et le chargement moyen des bateaux.

Il sera, dans ce cas, facile de déterminer approximativement le nombre de bateaux en circulation.

Représentons par T le nombre de millions de tonnes parcourant annuellement cette section ou $10^6 T$ le tonnage annuel par kilomètre et par C le chargement moyen des bateaux.

Si K est le nombre de kilomètres parcourus par le bateau dans une journée

$$300 CK$$

représentera donc le tonnage rapporté au parcours d'un kilomètre de canal.

Le nombre de bateaux en circulation par kilomètre sera donc de

$$n = \frac{10^6 T}{300 CK}.$$

Leur espacement en kilomètres, pour un même sens de marche, sera donc donné par

$$e = \frac{600 CK}{10^6 T}.$$

S'il s'agissait donc d'une installation de touage à appliquer à une section de 60 kilomètres de longueur, ayant un trafic annuel de 3 500 000 tonnes, desservie par des péniches de 300 tonnes devant effectuer un parcours journalier d'environ 30 kilomètres; ce qui, pour une journée de 12 heures, fait une vitesse commerciale de 2 500 mètres à l'heure.

Le raisonnement précédent montre que les écluses reçoivent journellement 78 bateaux, leur espacement dans un sens de marche étant de 1,5 kilomètre.

Supposons enfin que le nombre de bateaux marchant dans les deux sens soit le même, que dans un sens ils soient tous chargés, que dans l'autre deux tiers seulement soient chargés et un tiers vides. Le nombre de bateaux passant dans le canal sera dans cette hypothèse de 94, leur espacement n'étant plus que de 1 275 mètres. Ils se suivront donc pour la vitesse indiquée à 27 minutes d'intervalle. Cette valeur montre que le trafic pourra s'effectuer régulièrement; elle est, en effet, suffisante pour permettre l'éclusage d'un bateau montant et d'un bateau avalant.

Si nous admettons que la traction de deux bateaux vides demande autant de travail que celle d'un bateau chargé, les 94 bateaux répartis le long du canal compteront pour le travail dépensé, comme 86 bateaux chargés.

Admettons que chaque bateau chargé demande à l'usine de production de force 3,2 kilowatts (*).

Cela nous conduit donc à une force totale de 275 kilowatts. En réalité, le service ne s'effectuera pas aussi régulièrement que nous l'avons supposé et le nombre de bateaux en circulation dans une même section pourra, certains jours, être beaucoup plus grand. Si le nombre moyennement constaté était 1,3 fois supérieur, cela nous conduirait à 358 kilowatts.

Pour un rendement de 91 % à la génératrice, cela nous donne une puissance de 535 chevaux, soit en chiffres ronds 5 550 chevaux-vapeur.

Il n'a pas été tenu compte, dans cette estimation, des efforts de démarrage. La chose n'est pas nécessaire, car il est probable et même évident qu'à l'instant où un bateau démarrera, au moins un sera arrêté, par ex : au passage d'une écluse, et ne consomme donc rien.

(*) On arriverait aisément à cette valeur par l'une des formules établies par M. Bellingrath.

Celle de M. de Mas semble mieux appropriée aux différents types de bateaux.

La résistance en kil. est donnée par

$$r = (a + bt) V^{2,25}$$

dans laquelle V = vitesse en mètres par seconde. t = enfoncement en mètres.

Pour une péniche	$a = 21,3$	$b = 123,6$
Id. flute	$a = 21,5$	$b = 78,1$
Id. toue	$a = 14,2$	$b = 52,4$

Cette formule n'étant toutefois applicable que pour des vitesses comprises entre 0,25 m et 2,50 m à la seconde et des enfoncements variant de 0,65 m à 1,83 m.

Pour le cas qui nous occupe nous obtiendrons, en supposant un

Cette force motrice sera produite soit par des machines hydrauliques, à vapeur ou à gaz.

L'utilisation des forces naturelles offre le grand avantage de n'exiger aucun combustible; les dépenses se bornent donc à l'entretien du matériel et à l'amortissement du capital. Dans certains canaux qui, en toutes saisons, ont un débit sensiblement constant, provenant d'une alimentation naturelle ou de réservoirs, l'emploi de moteurs hydrauliques est tout indiqué. Dans le cas des rivières canalisées, soit qu'elles possèdent des barrages fixes ou mobiles, la chute diminue sensiblement ou devient nulle pendant la période des hautes eaux, alors que la navigation est active et que, le courant étant fort, les bateaux

enfouissement maximum de 1,80 m et une vitesse absolue de 3 kilomètres à l'heure,

$$r = (21,3 + 123,6 \times 1,8) 0,835^{\frac{2,65}{2}} = 160 \text{ kil.}$$

La formule de Du Buat $c = \frac{8,46}{n + 2}$, dans laquelle n représente le rapport de la section mouillée de la voie à la surface de la partie immergée du maître couple, donne la résistance dans une voie de dimensions limitées, la résistance en eau indéfinie étant prise pour unité.

Supposons donc que dans notre cas $n = 4$, nous aurons $c = 1,41$. La résistance du bateau sera donc de 226 kilog.

La propulsion exigera un travail de 1 925 watts utiles. L'appareil de touage ayant un rendement de 70 %, il faudrait 2 750 watts à la réceptrice. La ligne ayant un rendement de 88 %, la force à produire à l'usine serait donc de 3 120 watts.

Ce résultat n'est évidemment que très approximatif, la formule de Du Buat ne tenant pas compte des divers éléments qui interviennent dans le coefficient de résistance de la voie.

Elle n'est en effet applicable que dans les limites où les expériences dont on l'a tirée ont eu lieu; de plus, elle ne tient pas compte de la forme du profil mouillé.

ont besoin de grands efforts de traction. Il faudrait alors, si l'on ne peut utiliser la vitesse du courant à la production de l'énergie, avoir recours à de très fortes réserves de vapeur.

L'utilisation des forces naturelles n'étant pas toujours possible, il faut alors avoir recours aux moteurs à vapeur.

La production de l'énergie se fera-t-elle alors par stations indépendantes ou par usine centrale et sous-stations ?

Le premier procédé évite le transport de la force, mais demande un personnel plus nombreux ; de plus, il exige un grand nombre de petites unités de force qui consomment plus de combustible par cheval produit que les grandes. La station centrale diminue le personnel, mais occasionne des pertes dans le transport et dans les différentes transformations.

L'usine centrale deviendrait certainement préférable aux usines isolées, si celles-ci étaient en grand nombre, mais, comme nous le verrons plus loin, une station centrale ne pouvant alimenter que deux ou trois sous-stations, nous croyons que, dans l'emploi de machines à vapeur, il sera plus économique d'avoir une station pour chaque section sans passer par des postes de transformation.

L'emploi des moteurs à gaz, qui n'exigent que des frais de conduite insignifiants, tendrait encore à donner un certain avantage aux stations indépendantes.

Le moteur à gaz pauvre lutte avantageusement, au point de vue de l'économie du combustible, avec la machine à vapeur, dès qu'il s'agit de forces supérieures à 25 chevaux. Le moteur à gaz de ville permet une diminution considérable des frais de premier établissement et une exploitation économique. Le moteur à pétrole semblerait enfin réaliser le mieux les conditions du problème;

sa dépense par cheval de puissance est malheureusement trop élevée. Il ne convient que pour de très-faibles forces.

Ces usines alimenteraient, sous une tension de 500 volts, la canalisation par section de 10 à 15 kilomètres.

Une station centrale fournissant le courant à des postes de transformation, permettrait d'alimenter 40 kilomètres de canal.

L'emploi des courants bi et triphasés n'est pas nouveau dans l'industrie; les nombreux avantages qu'ils présentent les ont fait préférer dans bien des cas; leur application à la traction vient d'être couronnée de succès. Pourquoi n'en serait-il pas de même pour la propulsion des bateaux?

Une installation par courant continu avec sous-stations de transformation a un rendement plus faible qu'une par courant polyphasé; de plus, elle exige des frais d'installation plus grands et les sous-stations demandent plus d'entretien et de surveillance.

L'objection principale qui peut être faite, est que l'emploi des courants bi et triphasés nécessitent l'emploi de trois fils de ligne. L'examen de ce point montre que ce désavantage n'est pas aussi sérieux qu'il le paraît au premier abord.

La difficulté provenant de la prise du courant serait facilement résolue par l'emploi d'un dispositif analogue à celui représenté fig. 46. Le chariot roulerait sur la ligne inférieure et deux petits trolleys porteraient sur les deux fils placés immédiatement au-dessus. Un tel appareil ayant trois points d'appui aurait même l'avantage de constituer un système indéraillable.

En ce qui concerne les moteurs, l'expérience démontre qu'un moteur polyphasé par sa construction plus simple et plus robuste présente, comparé à un moteur à courant continu, une plus grande sécurité de fonctionnement. Cette condition doit entrer sérieusement en ligne de

compte, ces organes devant être maniés par des hommes peu au courant de leur maniement.

Le réglage de la vitesse s'effectue à l'aide d'un modérateur agissant sur les courants induits et un commutateur de changement de marche que porte le coupe-circuit en relation avec l'inducteur.

Ils sont, tout comme les moteurs continus, aptes à fournir un couple de démarrage notablement supérieur au couple normal. En marche normale, le moteur conserve une vitesse sensiblement constante, quelles que soient les variations de charge.

Si en cours de route une puissance plus grande de l'appareil moteur est nécessaire ; par exemple, pour le passage des écluses, on peut par une simple commutation diminuer le nombre des pôles du moteur, ce qui entraîne une augmentation de vitesse.

Pour l'aimantation de la poulie de touage du système de Bovet trois solutions se présentent immédiatement :

1^o Emploi d'une source indépendante, pile ou accumulateur. Ce moyen n'est pas à conseiller, il présenterait, en effet, le grand défaut d'augmenter les frais d'entretien des appareils et de les alourdir.

2^o Emploi d'une petite magnéto ou d'une dynamo shunt de 0,5 kw. placée sur l'arbre du moteur actionnant l'appareil. Le courant ainsi produit serait reçu par la bobine magnétisante de la même façon que précédemment.

3^o Emploi d'un transformateur de courant polyphasé en courant continu (fig. 49).

Vu les dimensions réduites qu'aurait cet appareil, il serait bien simple de construction. En un point convenablement choisi à l'intérieur de la boîte serait fixé un inducteur A muni d'un système de bobines alimentées par une dérivation prise aux bornes de l'appareil moteur.

A l'intérieur de celui-ci serait disposé un second anneau, fixe également, du genre Gramme par exemple, muni de son collecteur ordinaire. Le champ tournant produit dans A engendrera dans B une force électromotrice égale à celle qui prendrait naissance si, ce même champ étant fixe, l'anneau B tournait en sens contraire et avec une vitesse égale à celle du champ tournant.

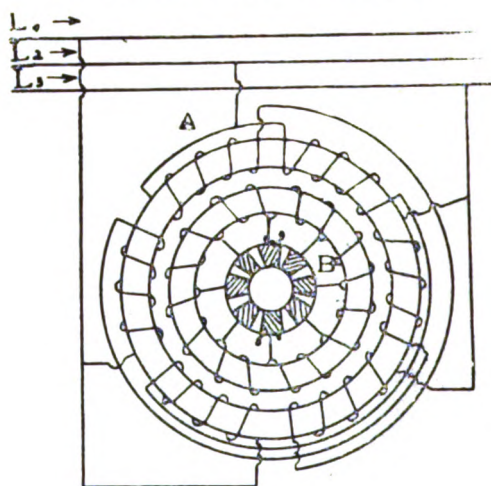


Fig. 49.

Ce schéma suppose un enroulement Dolivo-Dobrovaelsky permettant d'obtenir 6 courants excitateurs décalés 2 à 2 d'un douzième de période.

Si donc on dispose, pour un instant donné, deux balais frottant sur le collecteur suivant la ligne neutre, on recueillera un courant continu.

Puisque le champ et par conséquent aussi la ligne neutre se déplacent, les balais devront suivre le champ tournant dans son mouvement. Il suffira donc de monter ces balais sur un balancier fixé à un barreau de fer doux

mobile autour de l'axe commun des anneaux A et B, et formant armature de l'inducteur A.

Les balais se trouveront donc entraînés synchroniquement au champ. Etant mobiles, ils devront être connectés à deux bagues sur lesquelles le courant sera recueilli au moyen de deux frotteurs fixes.

Le courant ainsi produit aimanterait encore comme précédemment la poulie de touage.

Ces deux derniers procédés, empruntant leur énergie à la même source que le moteur principal, seraient plus simples de réglage ; de plus, ils ne demanderaient aucun surcroît d'entretien.

* * *

L'établissement d'une telle canalisation ne présente rien de particulier.

Un point, cependant, mérite d'être traité avec un certain soin.

Dans les courbes, le fil de trolley suit les côtés d'un polygone dont les sommets constituent les points supportés. L'écartement de ceux-ci varie alors avec le rayon de la courbe. Deux cas sont à envisager :

1^o *Chariot roulant.* — Le plan du chariot reste dans le plan vertical du fil jusqu'à ce que la joue de la roue d'avant rencontre un des côtés de l'angle. Elle suit ce dernier jusqu'à ce que le sommet de cet angle arrive contre la joue opposée de la poulie d'arrière. A partir de ce moment, la première tend à se remettre de plus en plus dans l'axe. Elle y revient tout à fait lorsque la deuxième a passé le sommet.

Il serait facile de déterminer analytiquement l'angle minimum que peuvent faire les deux fils pour éviter le déraillement du chariot. La forme la plus rationnelle

à donner à la gorge de la poulie étant un hyperboloïde à une nappe, si son angle d'ouverture est inférieur au supplément de l'angle des deux portées, la joue de l'une d'elles montera sur le fil et fera dérailler le chariot.

En pratique, cette forme devra être légèrement modifiée, afin de permettre le passage facile au-dessus des isolateurs. L'angle minimum serait alors facilement déterminé par tâtonnements.

2^o *Trolley*. — L'emploi du trolley donne lieu à d'autres difficultés. Un bateau n'est, en effet, pas guidé; il peut osciller de part et d'autre de l'axe de la voie d'eau, de toute la largeur de celle-ci. Si l'on adapte un bras trop vertical, chaque oscillation se traduira par un déraillement du trolley. Il faut, au contraire, avoir un bras presque horizontal et le plus long possible. Si on le peut, il faut adopter une longueur telle qu'au moment où le bateau touche la berge, le bras du trolley fasse, avec la ligne conductrice, un angle inférieur à 30°. Ce sont là des conditions toutes spéciales qui exigent une construction particulière des divers organes. Ainsi, pour un canal de 12 mètres de largeur fréquenté par des péniches ayant 5 mètres de largeur au maître couple, le fil étant à 7 mètres au-dessus du niveau de l'eau, la longueur minimum de la perche serait de 11,70 mètres.

La longueur du bras du trolley devenant énorme et, de plus, ce bras se trouvant presque couché, le moment de flexion du bras et de traction sur les ressorts raidisseurs serait très grand. Il faudrait donc non seulement armer cette perche de ressorts très puissants et auxquels on donnerait, de plus, un assez grand bras de levier, mais il faudrait aussi construire la perche et la roulette de la façon la plus légère possible.

ACCUMULATEURS

On a aussi préconisé l'emploi des accumulateurs. Les premiers essais eurent lieu dans la navigation de plaisance. En Angleterre, la « Général Traction Compagny » organise des flottilles sur la Tamise. Elle employait des batteries E. P. S. composées de 44 à 180 éléments, suivant la dimension des embarcations. L'hélice à deux ailes était actionnée directement par des moteurs tétrapolaires excités en série.

En France, un essai eut lieu en 1894 avec un canot construit par la Société Boulet et Cie. L'accumulateur était constitué par une batterie de 52 éléments Gadot qui activait un moteur Gramme supportant comme débit maximum 41 ampères à 100 volts. L'hélice était à trois ailes et faisait 300 tours par minute.

Des essais de vitesse ont prouvé que, pour faire 1 kilomètre, il fallait 4' 18", ce qui correspond à 14 kilomètres à l'heure. En pleine décharge, les accumulateurs donnaient un débit de 30 ampères à 100 volts. En comptant sur un rendement de 80 % au moteur le travail obtenu sur l'hélice est de 3,25 chevaux. Pendant toute la décharge correspondant à la ligne horizontale, représentée sur le diagramme (fig. 50) le débit a été de 27 ampères et le travail obtenu sur l'hélice de 3 chevaux.

Le point où la courbe fait un ressaut correspond à la suppression des résistances intercalées dans le circuit des accumulateurs ; à partir de ce moment le débit s'est fait en plein et a diminué un peu jusqu'à la fin de l'expérience.

La marine militaire trouva également un auxiliaire précieux dans les accumulateurs pour la navigation sous marine.

Le *Gymnote*, le premier torpilleur sous marin construit d'après les plans de l'amirauté française, fit ses essais définitifs en 1888 en rade de Toulon.

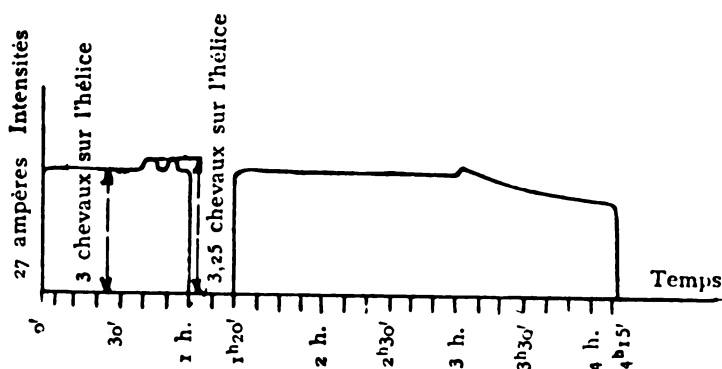


Fig. 50.

Courbe de décharge des accumulateurs.

Il est mis en mouvement par une puissante hélice à 4 branches de 1,50 m. de diamètre. L'appareil moteur est une dynamo électrique du capitaine Krebs ; elle est à 16 pôles disposés autour d'un anneau mobile de un mètre de diamètre et muni d'un collecteur avec 4 balais : deux pour la marche avant, deux pour la marche arrière. Elle tourne à 250 tours par minute et actionne directement l'hélice. Ce moteur pèse 2 000 kilogrammes et peut fournir une force normale de 60 chevaux-vapeur avec un courant de 220 ampères sous 200 volts. L'énergie électrique est fournie par une batterie de 564 accumulateurs à liquide alcalin du type Commelin-Damazure-Baillache.

Chaque accumulateur pèse 17,5 k^{os}, soit en tout 9 840 k^{os}. Vu la capacité de 345 chevaux-heure, cela fait un poids de 28,6 k^{os} par cheval utile emmagasiné.

La capacité d'énergie permet de soutenir pendant six heures une vitesse de dix nœuds.

Dans ces deux premières applications, la question était relativement simple, l'économie étant considérée comme un point accessoire. Pour la propulsion des bateaux d'intérieur, le problème doit être envisagé tout différemment. Le gouvernail propulseur et le touage électromagnétique se prêtent également bien à l'emploi des accumulateurs.

Le propulseur Gaillot adapté à une péniche jaugeant 180 tonneaux et alimenté par une batterie Laurent Cely fournie par la *Société pour le travail électrique des métaux* effectua en 1894 une expérience près de Paris sur les canaux reliés à la Seine. Ce premier essai semble avoir été satisfaisant.

Dans un tel système les accumulateurs seront-ils ou bien dans une embarcation trainée à la remorque ou bien placés sur le bateau ?

Ce premier moyen ferait naître des difficultés au passage des écluses ; à part cet inconvénient, il présente plusieurs avantages. Il supprimerait, dans certains cas, la subdivision de la batterie et éviterait les manœuvres nécessaires pour son embarquement et son débarquement.

La suppression des manœuvres a son importance :

1^o Au point de vue des frais résultant du transbordement des batteries à l'usine et de ceux résultant de l'installation d'appareils coûteux, tels que monte-charges, banquettes de chargement, voies de transports, etc.

2^o Au point de vue de la conservation des éléments. Les chocs et les violentes vibrations provoquées par le transbordement de ceux-ci sont, en effet, une cause de détérioration rapide des plaques.

Une installation permettant le rechargement des batteries sans les retirer des embarcations serait bien simple à établir. On amarrerait ces dernières le long de

l'usine, qui serait construite sur la berge; des connexions fixes les relieraient au tableau de distribution.

Contrairement à ce qui a lieu dans les services de tramways, le poids de la batterie est très faible relativement au chargement du bateau.

Ainsi pour une péniche de 350 tonnes devant marcher pendant 4 $\frac{1}{2}$ à 5 heures, à raison de 3 kilom. à l'heure, le touage électro-magnétique nécessiterait une batterie de 110 ampères-heure. Elle pèserait en ordre de marche environ 1 000 k^{os} et formerait un parallépipède rectangle de 325 mm de haut et de 1,42 m² de base.

Pour le propulseur, la batterie serait de 180 A -H. Elle pèserait 1 750 k^{os}; elle occuperait une surface de 2,16 m² sur une hauteur de 325 mm. (*)

Dans l'établissement d'un projet par accumulateurs la tension la plus à conseiller serait de 110 volts.

La première chose à envisager est le nombre de batteries nécessaires pour assurer le service. Ceci sera chose fort simple lorsque l'on connaîtra, comme nous l'avons dit précédemment⁽¹⁾, le nombre de stations à installer et le nombre de bateaux passant journellement dans la section.

Il sera toujours bon aussi dans l'élaboration d'un avant-projet de pouvoir déterminer approximativement le poids des batteries à employer.

Par un raisonnement fort simple (**), nous avons trouvé

(1) Ces poids et dimensions se rapportent aux accumulateurs fabriqués par la Société l'Electrique.

(*) Soit I la capacité de la batterie et I₁ sa capacité par k^o de plaque.

I₁ représentera le poids de plaque par élément. En ordre de

marche on peut le supposer de 0.65 plus élevé, donc de $1.65 \frac{I}{I_1}$.

que le poids d'une batterie, exprimé en kilos, sera un peu supérieur au huit centième du nombre de watts-heure qu'elle doit fournir au moteur.

Considérons une toue du type de 350 m³ ayant un coefficient d'affluent de 0,97, son déplacement sera donc de 330 tonnes.

À la vitesse de 3 kilom. à l'heure, la résistance étant supposée de 0,37 k. par m³ de déplacement, la résistance totale à la traction sera donc de 125 k^{os}.

Le travail utile par seconde sera de 104 kgm., soit 1 020 watts.

La puissance à fournir du moteur devra donc être considérée comme sensiblement égale à 1 500 watts.

Pour une marche d'environ 6 heures, le poids de la batterie à installer sur la toue serait d'environ 750 k^{os}.

* * *

Avant de comparer les différents systèmes que nous venons de décrire, disons un mot des installations existantes.

INSTALLATION DE TOUAGE ÉLECTRIQUE AU CANAL DE BOURGOGNE (*).

Le touage du canal de Bourgogne est installé au bief de

À la tension E il faut $\frac{E}{1,97}$ éléments; donc en k^{os} $\frac{1,65 EI}{1,97 I_1}$ pour les batteries fournies par la Société l'Électrique.

La capacité utilisable au courant de 1 amp. s'élève à 15 amp.-heure par kilo de plaques; mais l'usine ne garantit les éléments que pour les $\frac{2}{3}$ de leur capacité absolue à cause des multiples facteurs qui peuvent altérer momentanément la capacité d'un accumulateur.

Pour une capacité de 10 ampères-heure, nous trouvons donc en substituant dans la formule précédente [0,0838 E I].

(*) Notice sur le touage électrique au canal de Bourgogne, par M. Gaillot.

partage sur une longueur de 6 kilom., dont 3 300 m. sont en souterrain.

Ce bief reçoit des quantités d'eau fort considérables : eaux des ruisseaux voisins en hiver et eaux provenant des réservoirs en été. Il peut disposer en toute saison de 30 000 m³ au moins par jour, dont 18 000 m³ à l'écluse de Pouilly et 12 000 à celle d'Escommes.

A Pouilly on dispose d'une chute de 7 m^s, soit 19 chevaux ; à Escommes on dispose d'une chute de 8 m^s, soit 15 chevaux. Soit un travail total de 34 chevaux-vapeur.

Les deux installations étant semblables, nous ne nous occuperons que de celle de Pouilly.

La turbine est du type Girard à distribution partielle. Son récepteur a un diamètre de 1,16 m. Elle fait 100 tours et transmet par engrenages le mouvement à un arbre horizontal qui fait 200 tours.

Le vannage comporte un secteur annulaire en bronze, coulissant sur la partie supérieure du distributeur. La commande peut se faire à la main ou par le régulateur ; la connexion entre la turbine et son vannage se fait alors par embrayeur magnétique du système de Bovet.

Les deux dynamos donnent chacune à leurs balais 11,6 et 9 chevaux électriques. Elles sont du type Gramme supérieur. Le régime de marche normal comporte une tension de 370 volts à Pouilly et 280 à Escommes. Ce qui correspond à un débit de 23 ampères environ.

Les deux génératrices sont couplées en tension et enroulées en dérivation. Cet enroulement shunt a été adopté parce qu'on avait prévu l'emploi d'une batterie d'accumulateurs.

Une telle disposition présente de grands inconvénients : l'enroulement en dérivation est une cause d'étincelles aux balais. En effet, le débit d'électricité absorbé par le

toueur est fort variable ; le champ magnétique de la génératrice étant invariable, la position des balais doit varier avec le débit. Une génératrice excitée en série n'aurait pas ce défaut, seulement elle ne conviendrait pas pour charger les accumulateurs.

En second lieu, chaque machine tend à inverser la polarité de sa voisine.

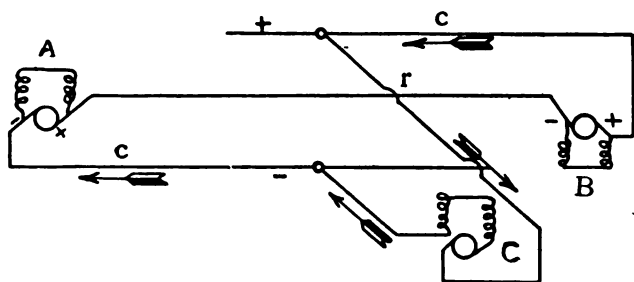


Fig. 51.

- A. — Dynamo d'Escommes.
- B. — Id. de Pouilly.
- C. — Moteur du toueur.
- c. — Fil conducteur.
- r. — Id. de retour.

Les deux génératrices A et B (fig. 51) sont reliées par le circuit général dont fait partie le toueur, de façon que leurs pôles de noms contraires se touchent. Le courant circule, suivant les flèches, tant dans le circuit général que dans les dérives.

On voit bien que chaque machine tend à inverser sa voisine en lançant dans sa dérivation un courant opposé à celui qu'y crée cette dernière.

Or, au moment où le toueur va démarrer, les turbines ne débitent que ce qui est nécessaire pour vaincre les frottements. Si l'on admet trop vite le courant dans la

réceptrice, on va demander aux turbines un travail supérieur à celui qu'elles reçoivent de l'eau; comme conséquence, elles vont ralentir d'autant plus vite qu'on aura admis plus de courant.

Comme la chute de Pouilly est plus faible que celle d'Escommes et que cependant on lui demande une plus grande force, c'est elle qui est la plus sensible à ces à-coups et la machine d'Escommes peut inverser la polarité des inducteurs de Pouilly.

Ces inversements, assez fréquents à l'origine, ne se produisent plus. La réceptrice est munie d'un rhéostat de très grande puissance, pouvant fournir 180 ohms de résistance. Il suffit donc déjà que le mécanicien du toueur se serve convenablement de ce rhéostat, pour que le courant admis à circuler dans le circuit ne puisse pas varier trop rapidement.

En manœuvrant lentement le rhéostat, le voltage des génératrices est maintenu à fort peu près invariable par le régulateur.

L'accouplement des génératrices en tension peut paraître, au premier abord, singulier; cette disposition présente cependant des avantages :

1^o Elle n'exige que 3 fils conducteurs.

Une telle distribution rendant constante la longueur du circuit électrique, les génératrices ne s'aperçoivent pas du déplacement du toueur; elles travaillent donc sans variation, donc meilleur rendement.

Avec le couplage en parallèle, ce résultat ne pourrait être atteint qu'avec une distribution à 4 fils. A Pouilly, 3 fils étaient déjà bien encombrants; 4 n'auraient plus été admissibles.

2^o Possibilité d'employer des génératrices à bas voltage, donc moins de perte à la terre.

Les fils conducteurs ont 8 mm de diamètre en bronze télégraphique résistant à 45 k⁰³ par millimètre carré de section et d'une conductibilité de 98 %. Le circuit présente donc une résistance de 3,9 ohms. Quand sous 600 volts l'intensité du courant est de 20 ampères, la chute de potentiel est de 78 volts; ce qui donne un rendement de 87 %.

Dans les tranchées, la ligne conductrice est portée par des fils de fer transversaux, comme le représente la fig. 52. Ils sont reliés aux poteaux par l'intermédiaire de tendeurs.

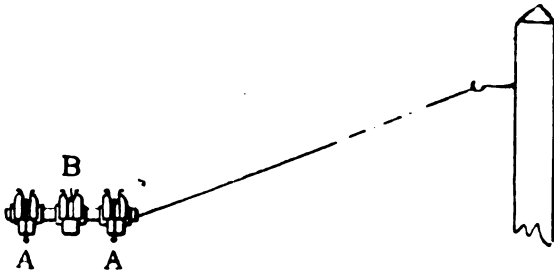


Fig. 52.

- A. — Fils de prise de courant.
B. — Fil de retour.

Le système des isolateurs est le même dans le souterrain; il est scellé dans la voûte par un étrier en fer (fig. 53). Dans ces deux cas, le fil reliant les 2 génératrices passe dans la gorge de l'isolateur et y est maintenu par une boucle en fil de laiton, serrée autour des champignons qui couronnent la porcelaine.

Les deux fils de prise de courant sont supportés par des étriers (fig. 54) et sont constitués en fil de 5 mm.

D'une construction et d'une pose faciles, ils sont aussi très avantageux dans les courbes, ils permettent d'éviter les toiles d'araignées que l'on rencontre dans les exploi-

tations de tramways. Mais ils ont un inconvénient : le fil d'étrier a, dans sa partie basse, une section en demi cir-

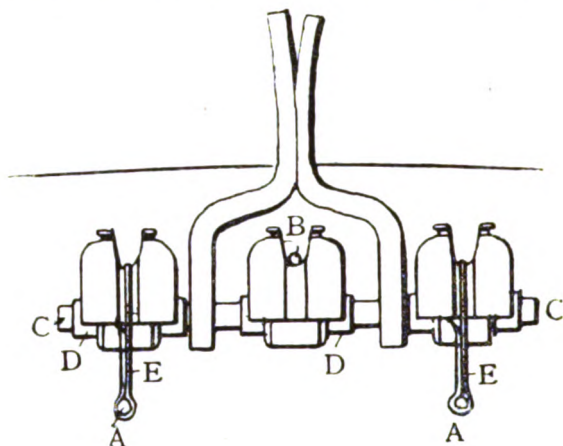


Fig. 53.

- A. — Fils de prise de courant.
- B. — Fil de retour.
- C. — Tube en fer.
- D. — Tubes isolateurs en caoutchouc.
- E. — Brides supportant la ligne.

conférence; il en résulte au passage du trolley des ruptures du courant et des étincelles. On a remédié en partie

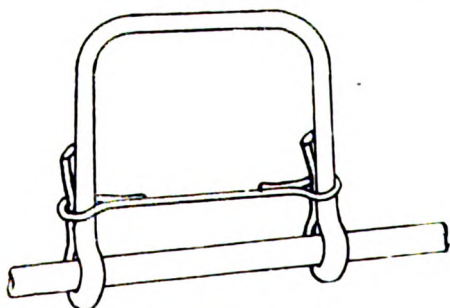


Fig. 54.

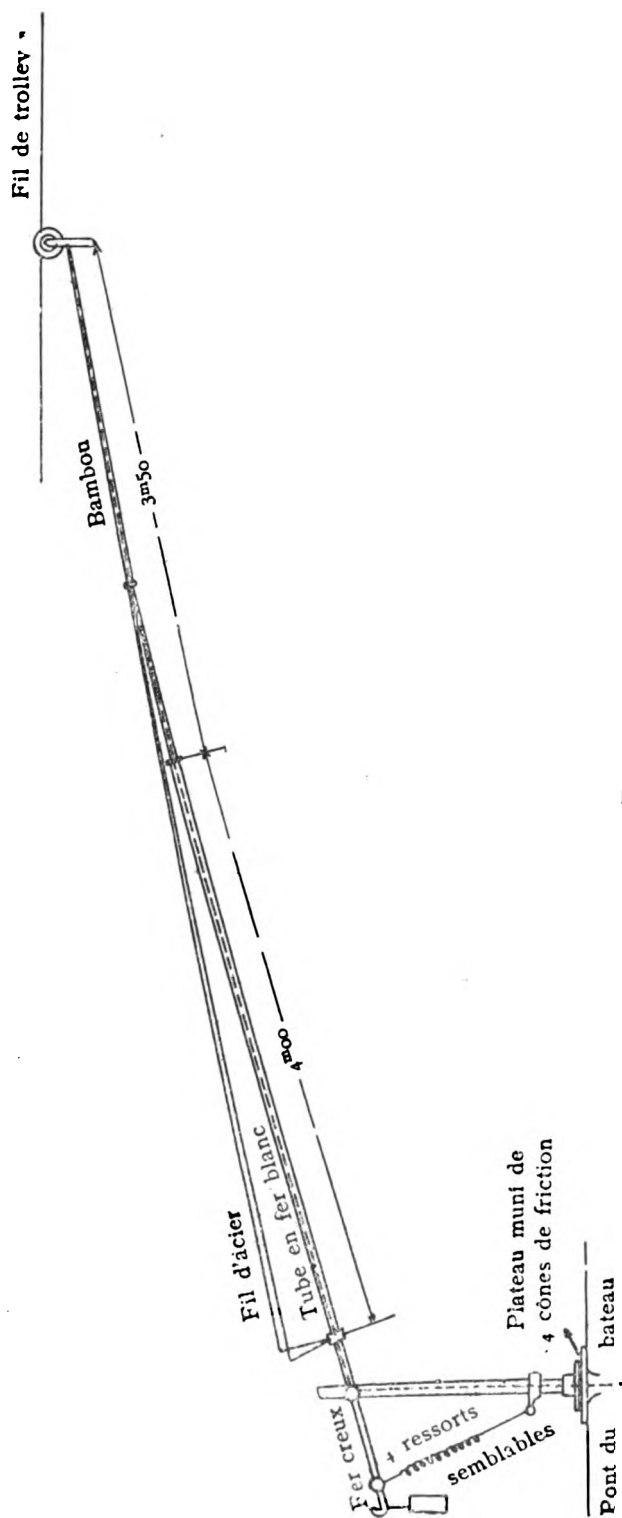


Fig. 55.

à ce défaut en substituant à la section 1/2 circulaire, une section en secteur très aplati de 1 mm d'épaisseur.

Ce système de suspension présente les avantages suivants :

- 1^o Rapidité de mise en place
- 2^o Le fil n'est pas fixé d'une façon rigide dans l'étrier.
- 3^o Absence de soudure.

La réunion des divers tronçons s'est faite en employant des manchons filetés en bronze à pas de vis contraires et qu'on visse sur les bouts taraudés des extrémités du fil.

Ce moyen a deux avantages :

- 1^o Le contact étant établi par des surfaces de vis présente une grande surface et est très bon.
- 2^o Les nœuds permettent soit d'allonger, soit de raccourcir la ligne.

La prise de courant se fait par deux trolleys (fig. 55). Les poulies sont garnies sur leurs bords d'un boudin en caoutchouc, de façon qu'elles ne puissent, en déraillant, produire de courts circuits entre les fils de ligne. Le courant recueilli par la roulette suit l'axe de celle-ci, passe par une feuille de cuivre tapissant les parois internes de la chape qu'elle sert en même temps à raidir et arrive dans l'axe vertical de rotation de cette chape. C'est sur cet axe et au-dessous de la perche du trolley qu'est fixé le fil conducteur et, de là, il se rend à la réceptrice en suivant la perche à laquelle il est relié en dessus par un ruban chatertonné.

La réceptrice est une dynamo Gramme, type supérieur, enroulé en série. Sous une tension de 550 volts et un courant de 30 ampères, elle fait 19 chevaux en marchant à 900 tours.

La poulie de la réceptrice R commande (fig. 56) par courroie le volant des engrenages du toueur. Sur l'arbre

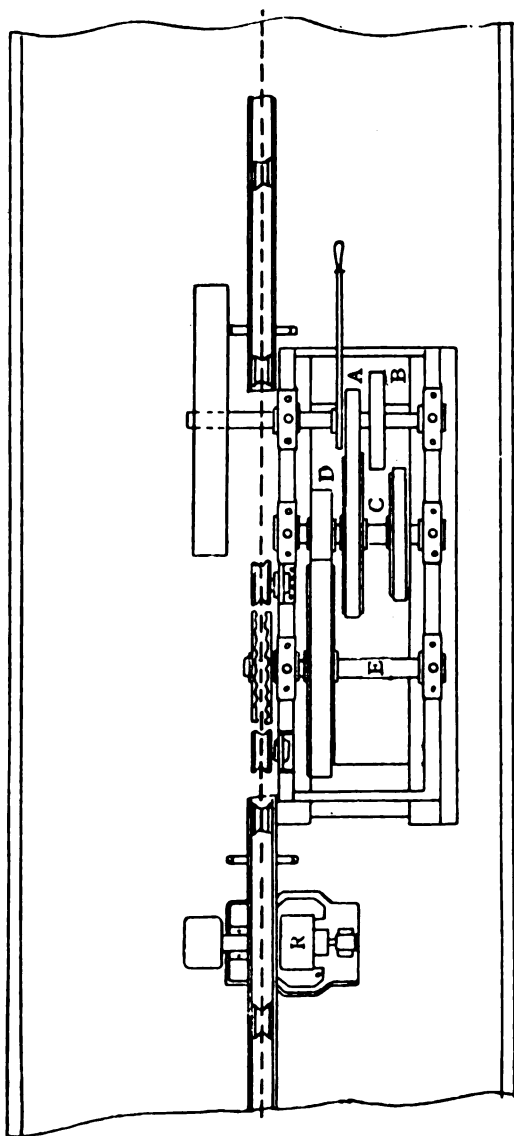


Fig. 56.

du volant est calé un ensemble de deux pignons A et B pouvant coulisser le long de cet arbre et engrener l'un ou l'autre avec les roues correspondantes du deuxième arbre C. Celui-ci porte un pignon D qui engrène avec une roue portée par un troisième arbre E. C'est sur cet arbre, qui fait 20 ou 40 tours, suivant qu'on emploie l'un ou l'autre des pignons du premier arbre, qu'est fixée en porte à faux la poulie toueuse.

Elle a 0,65 m. de diamètre, ce qui correspond à des vitesses de 0,65 m ou 1,30 m par seconde.

La poulie motrice à empreintes est du système Bouquié. Le chemin de chaîne est dans l'axe longitudinal du bateau. Cette disposition a pour avantage de faciliter la gouverne.

Le bateau devant pouvoir marcher dans les deux sens est muni de deux gouvernails de façon à pouvoir toujours commander celui qui est à l'arrière. En pratique, on se sert simultanément des deux, mais celui d'avant ne fait que de tous petits mouvements. Pour la traversée du souterrain, le bateau est éclairé par deux séries parallèles de lampes à 110 volts accouplées en tension. Une est de réserve de manière que si l'une s'éteignait, on en ait immédiatement une en remplacement. Un commutateur à trois directions permet de mettre, dans chaque série, 3, 4 ou 5 lampes en tension.

La batterie d'accumulateurs comporte 250 éléments; ils proviennent de la *Société pour le travail électrique des métaux*. Leur régime normal est de 10 ampères à la charge et 15 à la décharge. Elle est installée en dérivation sur la ligne et fait l'office de volant. Une telle batterie présente évidemment l'avantage d'emmagasiner la force des chutes lorsque le toueur est au repos. Mais dans une installation comme Pouilly, où l'eau ne fait jamais défaut, cet avantage perd de son importance.

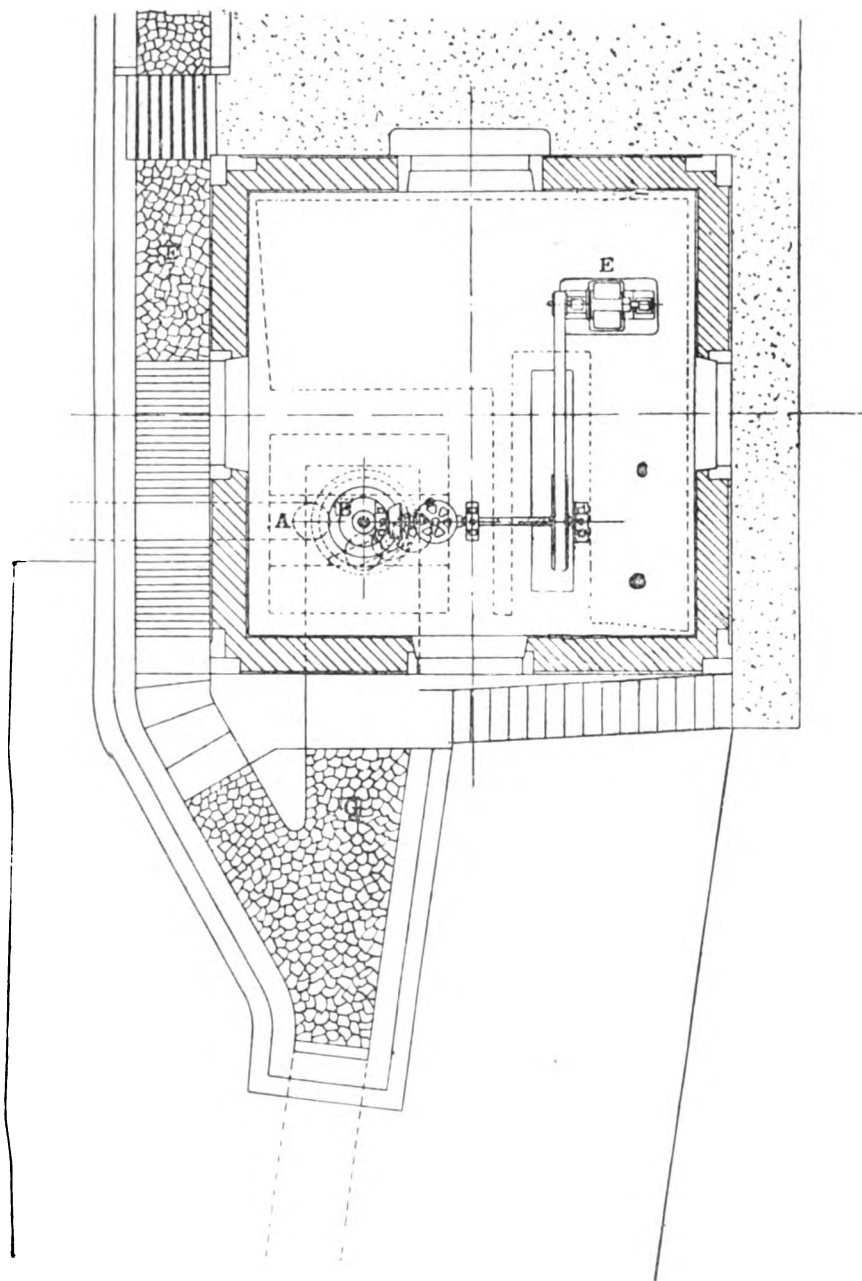


Fig. 57.

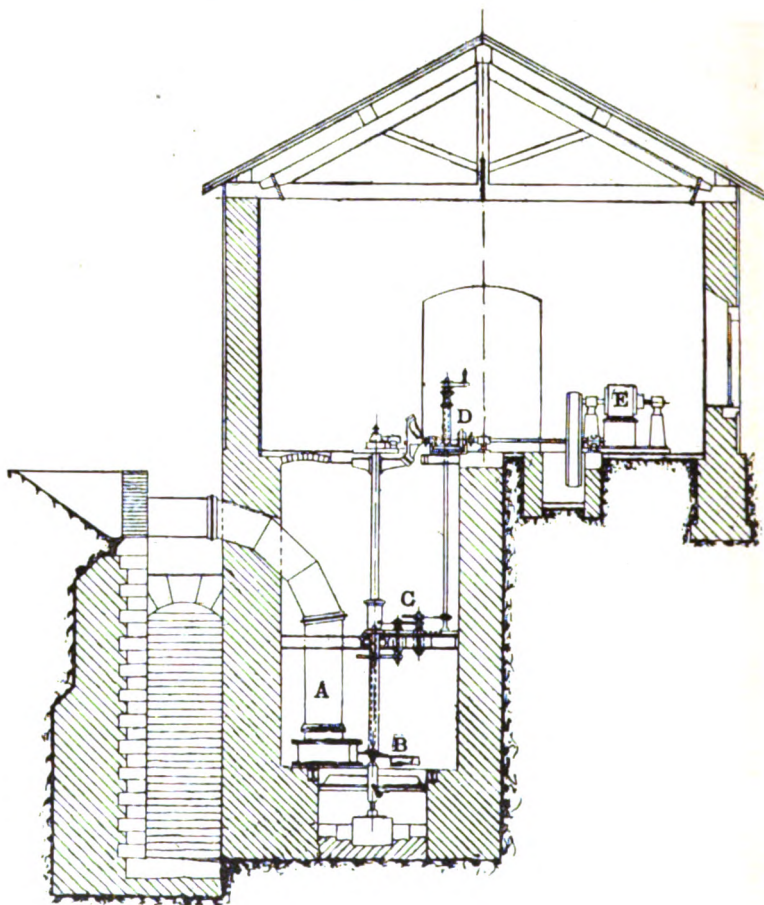


Fig. 58.

- A. — Tuyau.
- B. — Turbine.
- C. — Mouvement de vannage.
- D. — Servo-moteur à embrayage mécanique.
- E. — Dynamo.
- F. — Rigole du déversoir.
- G. — Rigole de fuite.

A l'origine, elle devait être installée dans le toueur. On a du renoncer à ce projet car les vapeurs acides qu'elle dégageait corrodait très vite les fers et causaient ainsi une usure rapide. On l'a installée dans la cave de la maison occupée, sur le port, pour le mécanicien chef du toueur. Ses pôles sont reliés au tableau de distribution de l'usine de Pouilly. Les deux usines ont des dispositions identiques. Les fig. 57-58 montrent la disposition générale des bâtiments.

Pendant une période de six mois le prix de transport pour toute la traversée a été de 0,071 frs par tonne ; tandis que par le touage à vapeur il était de 0,103 frs ; donc une économie de 30 %.

La vitesse de marche est plus grande, et enfin le toueur électrique ne produisant pas de fumée rend la respiration plus facile dans le souterrain.

AUTRE INSTALLATION SUR LE CANAL DE BOURGOGNE (*)

En juillet 1895, M. Denèfle recevait l'autorisation d'effectuer des essais sur le canal de Bourgogne entre le pont de Dijon et l'écluse 57, soit sur 4 kilomètres d'étendue.

La force motrice est, comme dans le cas précédent, produite par la chute de cette écluse où il passe journellement 40 000 m³ avec une chute de 2,60 m.

L'eau passe dans un aqueduc de 0,85^m construit dans le flanc droit de l'écluse, un peu en contre-bas du niveau de la flottaison d'amont ; une vanne circulaire sert à régler son arrivée sur la turbine qui est installée contre le mur en retour d'aval de l'écluse.

(*) *La traction électrique des bateaux au canal de Bourgogne*, par MM. Maillet et Dufourny.

Une transmission par engrenages actionne l'induit de la génératrice.

La ligne aérienne, placée à 5 m. au-dessus du chemin de halage, est supportée par des poteaux distants de 50 m. Deux chariots prise de courant servent à transmettre le courant soit au cheval électrique, soit au propulseur.

Ces deux appareils ont été décrits plus haut. MM. Maillet et Dufourny, ingénieurs du corps des ponts et chaussées belge, ont assisté aux expériences faites les 9 et 10 mars 1896. Ils concluent en ces termes :

Le cheval électrique a, en notre présence, opéré séparément le halage :

1^o D'une rame de 3 bateaux d'une charge totale de 566 tonnes ;

2^o D'une rame de 4 bateaux portant 739 tonnes.

La traction de ces convois s'est faite bien régulièrement et sans aucun incident ; la vitesse de remorquage a été de 1 900 m. environ par heure. Malgré la forte charge qu'il remorquait, le cheval électrique circulait sur la digue d'une façon bien stable et sans déviation transversale sous l'action oblique du câble de halage. Nous n'avons pas constaté que la circulation du tricycle eut occasionné de détérioration appréciable au chemin de halage.

Le bachot propulseur à hélice appliqué à l'arrière d'un bateau de 38,38 m. de longueur et de 5,02 m. de largeur avec un chargement de 217 tonnes a fait marcher le bateau, le 9 mars, à une vitesse variant de 2 410 m. à 3 150 m. par heure. Le 10 mars, le même engin a propulsé, à des vitesses, par heure, de 2 400 à 3 000 m, un bateau de 38,15 m. sur 5,05 m. portant 175 tonnes.

Les essais auxquels nous avons assisté nous ont montré que le bateau obéit au gouvernail muni de propulseur à hélice au moins aussi bien qu'un gouvernail ordinaire.

MM. Denèfle et Cie, qui sont en instance auprès du gouvernement belge en vue de l'installation de leur système de traction sur diverses voies navigables du pays, ont entrepris récemment, à Houdeng-Goegnies, des expériences identiques, afin de permettre aux administrations compétentes de bien se rendre compte du fonctionnement des appareils.

Elles ont été faites en plein bief sur une longueur de 120 m; la ligne conductrice supportée par des poteaux distants de 5 m se trouve à 5,60 m au-dessus de la crête intérieure du canal. Le courant est fourni par une dynamo de 25 chevaux actionnée par une machine à gaz aéropétrolique.

MM. Denèfle installent encore leur système sur le canal d'Aire et de la Deule, entre la Marles et Pont-à-Vendin, avec l'intention de l'étendre par la suite sur toute la section de 84 kilom. qui s'étend de Béthune à l'Escaut (*).

En 1895, il est passé sur le canal d'Aire 16 274 bateaux portant 3 118 000 tonnes, ce qui, d'après le tonnage moyen, équivaut approximativement à 11 000 bateaux chargés et 5 274 bateaux vides.

En tenant compte des chômages et interruptions de service, on est conduit à admettre qu'il se présente, par jour, à l'éclusage 34 bateaux chargés et 16 bateaux vides.

La puissance nécessaire au halage de ces 50 bateaux est d'environ 110 kw., soit 206 chevaux; mais par prudence on a compté 300 chevaux.

En raison de la nature particulièrement plate du pays parcouru par le canal, et de l'existence d'une seule écluse sur le tracé, il ne pouvait être question d'emprunter à

(*) *Industrie électrique.*

une force hydraulique la puissance motrice pour la production de l'électricité. La Société a donc été conduite à installer deux usines à vapeur, l'une à Beuvy, l'autre à Bauvin, comprenant chacune quatre machines à vapeur à détente Rieder de 50 chevaux, à 91 tours par minute; elles travaillent avec une admission du $\frac{1}{5}$ et utilisent la vapeur à 5,5 k^{os} par cm², actionnant chacune une dynamo génératrice. Elles sont alimentées par des chaudières semi-tubulaires de 135 m² de surface de chauffe, produisant 3 250 k^{os} de vapeur par heure.

Trois de ces machines fonctionneront en temps normal; la quatrième sera réservée comme machine de rechange ou, le cas échéant, viendra s'ajouter aux premières.

Les dynamos génératrices, construites par la Société alsacienne, sont garanties pour un rendement de 91 %; les réceptrices sont garanties pour un rendement de 87 %.

Dans chacune des deux stations, les trois groupes en marche normale débiteront 144 ampères, soit 288 ampères totaux. La tension sera, aux bornes de départ, 625 volts, et, au point le plus éloigné de la ligne, de 500 volts, en estimant à 30 volts le total des pertes par défaut d'isolement, etc.

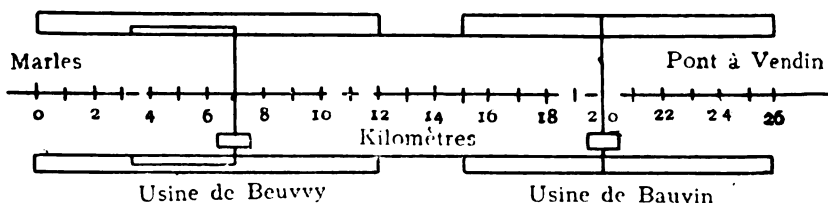


Fig. 59.

La ligne (fig. 59) est constituée par des fils de 7 mm en bronze chromé, de conductibilité égale à 98 %, en nombre variable suivant la section où l'on se trouve; la plus

chargée comprend trois conducteurs et la moins chargée deux. Ils sont supportés à 6 m au-dessus du sol par des poteaux en pin de Finlande, espacés de 40 m. Les fils de retour sont soutenus par des consoles en fer et communiquent avec la terre de deux en deux poteaux.

Cette installation est cotée à 700 000 fr. et, selon les prévisions de la Compagnie, l'exploitation reviendra à 155 500 fr.

Ces chiffres montrent qu'en adoptant pour prix du halage ceux qui existent sur la grande voie de Paris à la mer du Nord, il faudrait 2 300 000 tonnes pour couvrir les frais d'exploitation.

Ce nombre est en réalité dépassé; il est de

3 000 000 tonnes sur la Deule.

3 250 000 id. la Sensée.

4 500 000 id. le canal de St-Quentin.

* * *

La comparaison des systèmes décrits demande, pour être complète, d'être traitée au double point de vue de l'exploitation et de l'économie.

Une comparaison méthodique des divers systèmes funiculaires montrerait les difficultés surmontées, les tours de force mécaniques accomplis pour empêcher le déraillement du câble tracteur.

Amené au degré de perfectionnement que l'on sait par M. Maurice Lévy, la navigation possède un instrument de traction répondant parfaitement aux conditions fondamentales du problème. Il ne modifie en rien la forme des bateaux, il permet une organisation presque parfaite et est capable de surmonter les résistances accidentelles en cours de route, au passage des ponts, des écluses et des courbes.

Il présente cependant l'inconvénient d'avoir un câble de plusieurs kilomètres mis en mouvement par une seule machine et exposé à se déranger sans que le mécanicien puisse s'en apercevoir et provoquer sa rupture, danger fort grand pour les bateaux remorqués et pour les riverains.

Ce système oblige de maintenir le câble continuellement en mouvement quel que soit le nombre de bateaux qu'il y ait dans la section et ne permet pas au marinier de modifier la vitesse de son bateau.

On estime que la durée d'un câble tracteur peut être de quatre à cinq années; celle des poulies de support étant moitié moindre. La forte tension du câble a pour effet de déformer les bagues au passage des poulies horizontales; leur renouvellement s'impose tous les deux ou trois mois. Les transils demandent aussi un entretien constant; ils doivent être refaits en été une fois, en hiver deux fois par mois.

Reste l'inconvénient du vrillage. Il serait utilement combattu par la présence d'un homme à terre, suivant la corde du bateau et ayant pour mission d'empêcher l'enroulement de l'amarre s'il tendait à se produire.

Les constructeurs se sont préoccupés de cette idée de supprimer cette rotation continue du câble autour de son axe.

La manufacture de câbles « brevet Beck », à Stockach et Mannheim, semble avoir remédié au mal par l'emploi d'un câble carré composé de 4-8 torons tressés à la machine par moitié dans chaque sens. Les moments de torsion qui se produisent lors du fonctionnement, dans les différents torons, se compensent ainsi et la torsion du câble lui-même se trouve empêché.

M. Gröhe voit dans son emploi les avantages suivants :

1^o Le câble tressé, à section carrée, présente partout la même longueur de mailles à sa surface, attendu que le

tressage se fait entièrement à la machine, avec un avancement réglé automatiquement ; la section est ainsi très sensiblement la même partout.

2^o Ces câbles s'allongent beaucoup moins que ceux à section circulaire.

3^o Ce câble est plus flexible et exige ainsi une moindre dépense de force pour se plier aux changements de direction et d'altitude.

4^o Le travail résistant est diminué par suite de la moindre raideur.

5^o Le câble ne se tord pas ; il marche toujours avec la même partie de sa surface vers le haut.

Les avantages que l'on retirerait de l'emploi du câble à section carrée sont donc immenses.

La Société qui exploite ce brevet compte l'expérimenter dans une section du canal de Dortmund à l'Ems, sur 30 kilomètres de longueur entre Riesenbeck et Gleesen.

Cette section comprend 6 biefs et 5 écluses ; la force motrice sera produite par deux usines actionnant chacune deux câbles sans fin, soit en tout quatre circuits.

Espérons que cette installation, qui n'est encore qu'à l'état de projet, sera mise à exécution.

Le cheval électrique, par sa construction simple et robuste, est certainement appelé à donner de bons résultats. Il démarre d'une manière en quelque sorte instantanée et sans secousse ; il ne prend pas de place dans les écluses et peut, lors de l'entrée ou de la sortie, développer toute sa puissance. Il est à craindre qu'à la suite d'un service régulier il ne détériore le chemin de halage et exige de plus une ouverture suffisante des ponts qui franchissent le canal. Il exclut les pentes trop fortes qui peuvent exister sur celui-ci et exige un ouvrier pour le diriger ; par contre, il n'est pas encombrant et manœuvre

sur la berge avec une grande stabilité et est dirigé avec facilité. Il s'attelle rapidement au bateau et a le grand avantage de ne changer en rien les habitudes des marini-
niers.

Il permet la remorque d'un convoi aussi bien que la locomotion indépendante de chaque bateau.

Sa consommation d'énergie pour un bateau de

387 tonnes, à raison de 2 kilom. à l'heure, est 3,45 kilowatts.

186 id. id. 3 id. id. 1,8 id.

Le cheval à vide, id. 6 id. id. 0,9 id.

Le système Lamb n'a pas, à notre connaissance, été appliqué sur une grande échelle à la traction des bateaux. Les chariots ne sauraient se croiser ; il est donc indispensable, pour un trafic intense, de séparer la navigation dans les deux sens, en plaçant un câble porteur sur chaque rive. Un certain nombre de bateaux étant amarrés en même temps au câble de traction, il faudra lui donner une forte tension. Ceci présente, comme nous allons le voir, de graves inconvénients.

Prenons 3 bateaux chargés marchant dans le même sens à la vitesse de 1 mètre environ, nous obtiendrons déjà, en limitant la tension au chiffre modéré de 500 kgm. par centimètre carré en vue de l'usure, une section de câble d'environ 2 centimètres carrés. Eu égard à la raideur du câble, il faut donner un diamètre convenable aux poulies autour desquelles il s'enroule, afin d'éviter les ruptures et une usure trop rapide. Tout l'appareil devient donc plus pesant et plus coûteux.

Ce n'est donc qu'à des biefs peu étendus que le système pourrait être appliqué.

Le propulseur se manœuvre par le marinier qui est à bord du bateau. L'hélice, pour un gros trafic dans un canal à petite section, sera une cause de détérioration des

berges. Le choc des ailettes, contre la masse liquide, provoque dans celle-ci un mouvement tourbillonnant, dont les spirales ont le même axe que celui de l'hélice, lequel, en marche régulière, est parallèle à l'axe du canal.

De la composition du mouvement longitudinal, légèrement ondulatoire, provoqué par le déplacement du bateau et du mouvement rotatif dû à l'hélice, résulte dans l'eau un mouvement hélicoïdal qui attaque et détériore les berges. Cette action corrosive est un inconvénient beaucoup plus sérieux qu'il ne le paraît à première vue, car elle nécessite des ouvrages spéciaux pour éviter la déformation de la cunette.

L'hélice donnera difficilement le coup de collier nécessaire pour la traversée des écluses. Cet inconvénient n'aurait de l'importance que sur les voies à grand trafic où il y a nécessité d'écluser rapidement. Le propulseur évite par contre l'emploi d'une corde de halage, qui est une sujétion quand deux bateaux se croisent, et il peut laisser la digue libre pour la traction animale et pour le passage des voitures. Pour trouver place dans l'écluse, il est obligé de rabattre son gouvernail à 90° ce qui a pour effet de produire un effort initial oblique, par rapport à l'axe du bateau, jusqu'à ce que le redressement du gouvernail soit possible.

Un autre inconvénient est que cette hélice sera toujours mal placée à l'arrière d'une péniche qui n'a pas des formes favorables à l'action de ce propulseur.

L'effet du propulseur sur la résistance peut être grande; l'hélice, par les courants qu'elle produit pour s'alimenter et par la réaction de son courant de décharge, occasionne une résistance propre qui n'existerait pas dans la remorque du bateau à la même vitesse.

Il serait intéressant de déterminer les formes qui, dans ce cas, donneraient le minimum de résistance à la marche.

Cette condition serait cependant relative, car l'affinement des formes diminue le déplacement et, par conséquent, la capacité de transport du bateau.

La dépense moyenne d'énergie pour la propulsion des péniches est de 4 kw.

Dans le touage électro-magnétique la puissance requise dans des conditions semblables aux précédentes est d'environ 2,2 kw.

La chaîne se comporte d'une façon tout à fait correcte sur la poulie de touage : vrillée ou droite, elle donne une adhérence excellente et s'arrache, avec l'aide du doigt de décollement, dans de bonnes conditions. C'est là un avantage fort grand pour les croisements lorsque l'on n'emploie qu'une chaîne, car avec le système de prise d'adhérence au moyen de deux tambours parallèles, le troquage est une opération difficile et parfois dangereuse sur les cours d'eau rapides. L'emploi de deux chaînes expose celles-ci à se mêler au passage des courbes prononcées. Le bateau se gouverne bien, la transmission de mouvement se fait régulièrement dès que la chaîne se tend, la mise en route se fait vivement.

Ce système semble donc réaliser comme rapidité et rendement tout ce qu'il est possible d'espérer.

Une exploitation par accumulateurs pourrait se justifier dans certains cas. Elle présenterait, en effet, l'avantage que tous les bateaux sont indépendants l'un de l'autre et qu'un dérangement à la machine génératrice de la station centrale, ni un dérangement à la ligne n'influenceraient la marche des bateaux, parce qu'ils porteraient chacun leur propre force motrice. Les systèmes par conducteurs aériens permettent cependant une grande souplesse dans le trafic. Celui-ci pourrait être modifié facilement sans occasionner des dépenses notables, tandis que les

systèmes à accumulateurs exigent une transformation à l'usine centrale.

Dans les villes possédant un réseau de canaux, les accumulateurs sont presque seuls possible. Dans ce cas, en effet, le fil de trolley placé sur la berge serait une grande complication au point de rencontre des canaux; placés dans l'axe de la voie, les fils transversaux nécessaires pour la supporter gêneraient la navigation animale à mât levé et la navigation à vapeur. Il en est de même dans les différents bassins d'un port de mer; les bateaux devant pouvoir évoluer en tout sens, aller s'amarrer soit à quai, soit contre le flanc des navires, afin de permettre le transbordement facile et rapide des marchandises.

Il eut été intéressant de pouvoir comparer ces divers propulseurs au point de vue de la consommation d'énergie et d'en déduire l'effet utile de chacun d'eux. La chose n'est malheureusement pas possible, car, quoique les différents promoteurs se soient servis du même type de bateau, la péniche flamande de 38 mètres, ils sont muets relativement à l'enfoncement de ces derniers et à la nature de la voie navigable.

Cette condition est loin d'être négligeable; en effet, à des vitesses modérées pour des bateaux dont le coefficient d'affinement, très voisin de l'unité, varie dans des limites fort restreintes, l'effort de traction par mètre cube de déplacement, soit par tonne de poids total, varie dans des proportions très étendues, qui peuvent dépasser celle du simple au double. Les résistances sont de deux espèces: celles afférentes au bateau; celles dues à la voie.

Résistances afférentes au bateau. — 1^o La nature et l'état de la surface de la coque ont une grande influence sur la résistance propre du bateau.

2^o Pour un même bateau et des enfoncements différents,

la résistance à la traction croît moins vite que la section immergée du maître couple et plus vite que la surface mouillée totale.

3^o Pour des bateaux de même section au maître couple, ayant des formes aussi identiques que possible, mais différentes par la longueur, la résistance totale à la traction est sensiblement la même, donc indépendante de la longueur.

Un convoi de bateaux donne donc une résistance totale à la traction sensiblement égale à la somme des résistances totales des embarcations qui le composent. On obtiendrait cependant des diminutions de résistance variant avec la vitesse si les remorques étaient serrées de manière à établir une solidarité aussi complète que possible entre les divers éléments d'un même convoi.

Résistances dues à la voie. — 1^o Pour deux canaux de même section mouillée, la résistance à la traction est notablement moindre dans celui où le mouillage est le plus grand ;

2^o La résistance dépend de la nature et de l'état de la surface des parois de la voie. Elle est moindre dans une voie dont les berges sont défendues par un perré bien lisse que dans une autre où ces mêmes berges sont protégées par une végétation de jones et de roseaux ;

3^o Le profil rectangulaire offre une supériorité marquée sur le profil trapézoïdal au point de vue de la résistance à la traction.

* * *

La comparaison de ces différents systèmes au point de vue économique serait certes des plus intéressantes ; mais la fixation d'un prix de revient, à priori, avant une assez-longue application, serait des plus délicates.

Avant d'aborder les systèmes mécaniques analysés plus haut, disons un mot de la traction animale.

Dans des rapports admirablement ordonnés, M. Derôme, ingénieur en chef des voies navigables du nord de la France, montre ce système rudimentaire triomphant successivement de tous les propulseurs mécaniques, exploitant, quand il le faut, à un bon marché étonnant et descendant ces prix jusque 2 millimes par tonne kilométrique.

Ce système présente sur tous ses concurrents mécaniques un avantage de tout premier ordre : c'est la presque nullité des frais généraux. Toute dépense de halage se décomposant en deux facteurs : un terme constant, quelque soit le nombre de bateaux trainés ; un terme proportionnel au nombre de bateaux tirés. La valeur très faible du premier facteur montre qu'il y a peu de probabilité pour qu'une installation mécanique arrive à diminuer, même faiblement, le prix de la tonne kilométrique. Mais l'accroissement de vitesse, grâce auquel le canal pourrait être franchi plus rapidement, constituerait, en fin de compte, au bénéfice de la batellerie, une économie certaine.

Dans le halage funiculaire, le prix de premier établissement est élevé. Sur l'Oder et la Sprée, il est revenu à 34 414 francs par kilomètre, et sur les canaux de St-Maur et de St-Maurice à 28 846 francs. Les frais d'exploitation annuels par une marche journalière de douze heures sont évalués 4 600 fr. par kilomètre, y compris l'intérêt et l'amortissement du capital. Le prix de la traction revient dans ces conditions à environ 0.002 fr. par tonne kilométrique. Au souterrain du Mont-de-Billy, le prix de l'installation a atteint 50 000 fr. par kilom. et l'exploitation revient à 5 775 fr. Le prix de la tonne kilomètre est donc un peu

supérieur à 0.004 fr. M. Maurice Levy fixe à 900 000 tonnes la limite en dessous de laquelle le trafic d'une voie ne peut descendre pour que le halage funiculaire soit à même de soutenir la concurrence du halage par chevaux.

Le halage funiculaire semble l'emporter sur tous ses concurrents électriques pour tous les trafics inférieurs à 2 500 000 tonnes.

Le cheval électrique semble voué à un échec certain sur les canaux à petite section fréquentés par des bateaux de faible tonnage, excepté toutefois pour des trafics très élevés. Sur les canaux donnant accès à des bateaux de fort tonnage, il permettrait une légère diminution sur le prix de la tonne kilométrique et réduirait la durée du parcours.

Appliqué à la remorque des convois de bateaux sur les rivières et les courants à longs biefs il lutterait encore plus avantageusement contre le cheval de halage.

Les frais de premier établissement peuvent s'évaluer à 26 000 francs par kilomètre ; le prix d'un cheval électrique étant de 5 700 francs.

Dans les procédés de la troisième catégorie, pour un tonnage annuel de 3 000 000 tonnes, la propulsion par hélice semble coûter environ 25 % plus cher que le touage. Pour les trafics de moindre importance, c'est le contraire qui se produit ; ainsi pour 200 000 tonnes, le touage reviendrait sensiblement 11 % plus cher que le gouvernail propulseur. L'égalité entre les deux systèmes semble s'établir entre 400 et 500 000 tonnes ; mais pour ce tonnage, ces deux systèmes sont distancés par le halage. Pour les gros trafics, ils semblent pouvoir soutenir avantageusement la concurrence.

Sur le canal d'Aire et Deule, l'installation revient à 27 000 francs par kilomètre ; le prix de l'exploitation étant évalué à 6 000 francs par kilomètre, la tonne kilométrique reviendrait à fr. 0.002.

Au bief de partage du canal de Bourgogne, l'installation a coûté 22 250 francs par kilomètre, ce qui a porté le prix de la tonne kilométrique à fr. 0.012 (*)

M. de Bovet estime que son système, appliqué à un canal de 50 kilomètres, pour un trafic de 3 360 000 tonnes, exigerait une dépense d'installation de 1 250 000 francs, soit 25 000 francs par kilomètre.

L'appareil de touage de Bovet est évalué à 3 000 francs. Le propulseur Denêfle, 6 300 francs.

Ces deux systèmes avec accumulateurs ne pourraient certainement convenir pour des trafics dépassant 2 000 000 à 2 500 000 tonnes. En dessous de ceux-ci, les dépenses d'installation et d'entretien diminuent plus rapidement qu'avec les fils aériens. Aussi voyons-nous, pour de faibles trafics, le prix de la tonne kilométrique s'abaisser progressivement et devenir inférieur à ceux trouvés pour les conducteurs aériens.

L'exploitation par accumulateurs serait donc d'autant plus avantageuse que les intervalles entre deux bateaux qui se suivent seraient plus grands.

Le prix des batteries à employer pour une péniche flamande devant marcher dans les conditions énumérées plus haut serait :

Pour le touage 2 200 francs.

Pour le propulseur 3 600 francs.

Cette grande question de la traction mécanique des bateaux sur les canaux a fait, en ces derniers temps, un pas immense.

(*) Cette somme aurait pu être réduite à 20 000 francs par la suppression de la batterie d'accumulateurs et des tâtonnements auxquels on s'est livré au début.

Si aucun des systèmes expérimentés ou proposés n'a donné jusqu'à présent pleine et entière satisfaction, espérons que, dans un avenir prochain, des progrès réels seront réalisés, car, comme l'a dit M. de Hirsh, seul le halage mécanique a le pouvoir de donner aux transports par eau, l'économie, la célérité et la régularité qui leur permettront de soutenir avec avantage la concurrence des chemins de fer. *(Applaudissements.)*

M. Del Proposto, président. — Je remercie notre camarade de l'étude qu'il vient de nous exposer.

Il se prépare en ce moment, à Bruxelles, un Congrès international de navigation auquel l'Association se fera représenter. Je crois répondre au vœu de l'assemblée en priant M. Van der Wallen de faire partie de notre délégation, son travail pouvant être présenté comme un rapport sur la question qu'il a traitée.

M. Van der Wallen. — Je ne pense pas que mon travail a l'importance que vous voulez bien lui accorder. Néanmoins j'accepte volontiers la mission dont vous me chargez.

M. L'Hoest, secrétaire général. — Je pense que le délai pour le dépôt des rapports est expiré. Néanmoins, des tirés à part de la note de M. Van der Wallen pourraient être mis à la disposition du Congrès. Adhésion.

La séance est levée à midi et quart.

CHRONIQUE.



Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Revel, Franco, avec M^{lle} Valentina Gentileschi.



Manifestation de l'Association en l'honneur de M. le Sénateur Montefiore.

Vivement émus des marques de sollicitude que notre Président d'honneur nous avait témoignées à l'occasion de l'installation de notre Société dans ses nouveaux locaux, nos camarades ont pensé que le moment était venu de reconnaître tout ce que notre Association doit à M. le sénateur Montefiore dont l'appui et les encouragements de toute nature nous ont permis d'être ce que nous sommes.

La forme de l'offrande s'imposait. Tout en laissant à M. Montefiore un souvenir durable de la manifestation de notre gratitude, la médaille que nous avons fait frapper à son effigie nous rappellera le temps heureux passé à l'Institut qu'il a fondé; elle personnifiera aussi, sous les traits de son Président d'honneur, la famille déjà bien grande de l'Association à laquelle nous sommes fiers d'appartenir.

La remise de la médaille a eu lieu le 19 juin dernier, dans l'après-midi, au Rond Chêne, par un temps superbe. A une soixantaine de membres qui accompagnaient le Comité s'étaient joints MM. Delarge, directeur général des télégraphes; Banneux, directeur d'administration,

tous deux membres d'honneur, et Samuel, l'artiste bruxellois bien connu à qui avait été confiée l'exécution de la médaille.

Cette nombreuse députation fut reçue à l'entrée du domaine par M. Van Obberghen, secrétaire ; mais, dès que M. Montefiore aperçut les ingénieurs, il se porta au devant d'eux avec son affabilité accoutumée et les conduisit à la terrasse du château ; là, entourant M^{me} Montefiore et M^{lle} Lucienne sa fille, se trouvaient M. le lieutenant-colonel baron Chazal, M^{me} la baronne Chazal et leurs demoiselles, M^{me} la comtesse de Limbourg-Stirum, M. l'avocat Neujean, M. Eric Gérard, vice-président d'honneur de l'Association, etc., etc

M. le Président Del Proposto prit la parole au nom de tous, en ces termes :

« Monsieur le Sénateur,

» C'est aujourd'hui jour de grande fête pour notre
» Association, et, si nos membres n'étaient pas dispersés
» dans toutes les parties du monde, le nombre de ceux
» qui vous entourent aujourd'hui serait plus que quin-
» tuplé. Mais, je puis vous l'affirmer, ceux qui n'ont pu
» répondre à notre appel sont de cœur à vos côtés. Je
» suis donc certain d'être l'interprète de tous les membres
» de l'Association, des élèves et des anciens élèves de
» l'Institut, en vous exprimant leurs sentiments de vive et
» profonde reconnaissance.

» Vos titres à notre gratitude, M. le Sénateur, sont trop
» nombreux et d'un ordre trop élevé pour que je puisse
» les exposer dans cette cérémonie tout intime. Ce sont
» ceux d'une existence qui semble vouée tout entière au
» soulagement de l'infortune, à la grandeur de la nation
» et à la propagation de la science.

» Par la fondation de votre Institut, qui a été un véritable événement scientifique et qui, grâce à l'enseignement magistral qui y est donné, a si largement contribué au développement de la technique de l'électricité, vous avez acquis d'impérissables titres à la reconnaissance de la science, et, nous en avons la conviction, cette reconnaissance se manifestera un jour avec l'éclat qui lui est dû.

» Depuis longtemps déjà, l'Association se proposait de vous témoigner l'attachement inaltérable qu'elle vous a voué, mais, peu nombreux alors, nous craignions de ne pouvoir donner à cette manifestation l'importance que nous désirions.

» Aujourd'hui, notre Société est déjà florissante; grâce à votre inépuisable générosité, elle est installée dans son home; forte de votre appui elle ne cessera de prospérer : son passé répond de son avenir.

» En frappant une médaille à votre effigie, nous avons poursuivi un double but. Nous avons voulu honorer d'abord celui à qui nous devons tant; nous avons répondu aussi au désir, si souvent exprimé par nos camarades, de laisser à chacun des anciens élèves un souvenir de l'Institut et de son fondateur.

» Cette médaille, Monsieur le Sénateur, c'est l'Association tout entière qui vous l'offre; veuillez la recevoir et la considérer comme le gage de notre affectueuse reconnaissance. »

En terminant son adresse, M. Del Proposto a remis à M. Montefiore l'écrin contenant six exemplaires de la médaille, deux en or, deux en argent et deux en bronze.

Puis s'adressant à Madame Montefiore, il reprit :

« Nous savons, Madame, avec quel intérêt vous avez suivi nos efforts pour créer et pour consolider notre

» Association. Aucun de nous n'ignore qu'en toutes
» circonstances vous avez voulu être la collaboratrice
» de notre Président d'honneur, aussi bien dans le
» domaine de la science que dans celui de la bienfaisance.
» Permettez-moi donc de vous présenter aussi, avec nos
» respectueux hommages, l'expression de notre profonde
» gratitude. «

De vifs applaudissements marquèrent la fin du discours de M. Del Proposto, pendant que de superbes bouquets étaient offerts à Madame Montefiore et à Mademoiselle Lucienne.

M. Montefiore a répondu longuement et en termes fort heureux à M. Del Proposto.

« Je suis profondément touché, a-t-il dit, de cette nouvelle marque de sympathie que vous me donnez aujourd'hui, vous qui m'avez habitué, depuis longtemps cependant, à recevoir des gages de votre gratitude.

» J'en suis d'autant plus ému que, personnellement, aucun de vous ne me doit rien. C'est dans un but d'utilité générale que j'ai agi en fondant l'Institut et je suis suffisamment récompensé en constatant que cette fondation répondait à un véritable besoin. En vous efforçant de profiter de l'excellent enseignement qui s'y donne, tous, présents et absents, vous vous êtes pleinement acquittés envers moi.

» Permettez-moi de saisir l'occasion qui nous réunit pour vous donner un conseil. En cherchant naturellement à tirer tout le parti possible de l'ensemble des connaissances acquises, tâchez, chacun d'entre vous, de vous assigner un but spécial d'application, et, ce but une fois choisi, poursuivez-le avec persévérance, car c'est le seul moyen d'arriver à des résultats vraiment féconds. Vous avez un exemple frappant de cette vérité dans les travaux

de M. le Professeur Dewar, qui, prenant pour point de départ la liquéfaction de l'acide carbonique, devenue aujourd'hui l'objet d'une industrie courante et importante, est parvenu successivement, puissamment aidé par Lord Reay, à liquéfier l'air atmosphérique, puis l'hydrogène et enfin l'argon, de sorte que, comme on l'a constaté à l'Académie des sciences de France, il n'existe plus actuellement aucun gaz qui n'ait été liquéfié.

» Au lieu d'éparpiller vos recherches, tâchez donc de les concentrer sur un objet déterminé et prenez pour devise celle que j'ai moi-même adoptée « En avant » en y ajoutant ce complément indispensable « avec persévérance ». »

M. Montefiore a remercié MM. Delarge et Banneux d'être venus au Rond-Chêne, et plus particulièrement de l'appui bienveillant qu'il avait toujours trouvé auprès d'eux chaque fois qu'il avait été en discussion avec le gouvernement au sujet de l'Institut, et, reprenant à ce propos la thèse qu'il a soutenue au Sénat, il déclare que l'État ne pourra jamais retirer sa protection aux Universités, ainsi que son ami et collègue au Sénat, M. Lammens, de Gand, l'y a maintes fois engagé.

Il a félicité encore M. Samuel de son œuvre et a remercié de nouveau les ingénieurs présents d'être venus aussi nombreux et les absents d'avoir bien voulu s'associer à une manifestation, toute à l'honneur de l'Institut.

Il a terminé en remerciant M. Del Proposto d'avoir bien voulu associer sa femme et sa fille à la manifestation en leur offrant d'aussi belles fleurs.

M. L'Hoest a donné lecture ensuite de nombreux télégrammes de membres et d'industriels regrettant de ne pouvoir assister à la manifestation, puis M^{me} Montefiore a prié ses hôtes de passer dans l'orangerie où un somptueux

buffet avait été dressé à leur intention et auquel ils ont fait le plus grand honneur, car tout était délicieux.

Après une promenade dans l'admirable jardin qui précède la terrasse et dans le parc, MM les ingénieurs ont pris congé de M. et M^{me} Montefiore en les acclamant chaleureusement une dernière fois

A sept heures, ils étaient rentrés à Liège, rapportant le plus ravissant souvenir de cet après-midi passé au Rond-Chêne.

SÉANCE DU 19 JUIN 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Bailly, Baudry, Bedoret, Betocchi, Bisacco-Palazzi, Bodde, Cheftel, Centonze, Comi, Cor-tivo, Crudenaire, De Bast, Decroës, Della Riccia, Delori, Del Proposto, de Waal, Exelbirth, Fontaine F., Hachez, Hainaut, Henrion A., Herzen, Larmoyer, Leguillon, L'Hoest, Lopatine, Manzoni, Mari, Maternowski, Maus, Mavrodis, Melotte, Micheels, Neujean, Nicolini, Ottavi, Pecher, Poggi, Riboni C., Roland, Roosen, Roussakoff, Schiesari, Schiffers, Schopoff, See, Semet, Somerhausen, Van der Wallen, Van Dievoet, Van Musschenbroek, Viscidi.

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

Le procès-verbal de la séance du 27 février publié au n° 4 du bulletin de l'année, ne donnant lieu à aucune observation, est approuvé.

La parole est donnée à **M. Della Riccia** pour la communication de son étude intitulée :

Étude graphique de la machine à courant continu excitée en dérivation.

§ 1. — Parmi les courbes caractéristiques d'une machine électrique à courant continu, dynamo ou moteur, il en est une qui pourrait se dire la courbe caractéristique par excellence, c'est la caractéristique à circuit ouvert de la machine tournant à vitesse constante, excitée par une source indépendante, c'est à dire la courbe de la force électromotrice de la machine en fonction du courant parcourant les bobines de l'inducteur, pour une vitesse donnée. Cette courbe caractéristique n'est autre que la courbe de Hopkinson, indiquant le flux traversant l'induit

en fonction de la force magnétomotrice, dont on a changé les paramètres des abscisses et des ordonnées.

Au moyen de cette courbe, que je dirai principale, on peut facilement déduire la forme des autres caractéristiques ; ceci présente un certain avantage pour la compréhension du fonctionnement de la machine, et permet une discussion simple de ses dimensions comme la résolution rapide de plusieurs problèmes.

Il suffit pour cela de connaître les résistances des différents circuits et de faire une hypothèse simple, mais valable, sur la réaction de l'induit.

Je me propose d'étudier seulement, par ce moyen géométrique, la dynamo en dérivation, maintenue à vitesse constante, et le moteur en dérivation alimenté à potentiel constant.

Je n'exposerai donc pas une méthode tout à fait nouvelle, car on trouve des tentatives semblables appliquées aux dynamos dans plusieurs ouvrages anglais et encore dans les leçons à paraître du regretté professeur Ferraris ; mais je tâcherai d'en faire une exposition plus complète et j'étendrai la méthode aux moteurs.

§ 2. — J'indiquerai par r_1 , r_2 , r la résistance de l'enroulement de l'armature (avec rhéostat de démarrage s'il y a lieu), celle de l'enroulement des inducteurs (avec rhéostat de champ s'il y a lieu) et celle du circuit extérieur ; par i_1 , i_2 , i les courants dans les mêmes circuits ; par N la vitesse de rotation de la machine.

J'appellerai v la différence de potentiel aux bornes, Φ le flux traversant l'armature, d'une pièce polaire à l'autre, e la force électromotrice vraie de la machine, α l'angle de calage des balais, à partir du plan neutre, compté positivement dans le sens du mouvement de rotation de l'induit.

En disant que Φ est le flux traversant l'armature d'une

pièce polaire à l'autre, j'inclus donc le flux antagoniste qui forme la réaction de l'armature et j'exclus au contraire le flux transversal engendré par le même organe. Je désignerai par $\mathcal{R}_2$ le flux dû aux inducteurs et par $\mathcal{R}_1$ le flux dû à l'induit. On aura donc

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_2 - \mathcal{R}_1.$$

Par conséquent, je pourrai distinguer encore deux parties dans la force électromotrice vraie de la machine : une force électromotrice agissante e_2 due aux inducteurs et une force électromotrice de réaction e_1 due à l'induit. On aura également

$$e = e_2 - e_1.$$

Ces relations sont vraies aussi bien pour le moteur que pour la dynamo.

En effet, si l'on compare la distribution des courants et des forces électromotrices dans la machine supposée bipolaire, fonctionnant comme dynamo et comme moteur, on voit (fig. 1) que, pour une direction déterminée du courant extérieur et du courant d'armature, entre les bornes

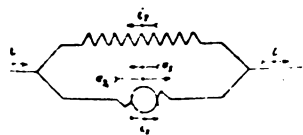


Fig. 1a.

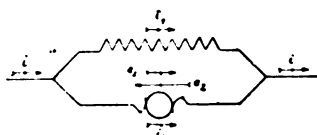


Fig. 1b.

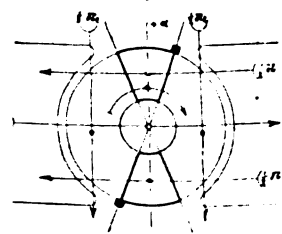


Fig. 1c.

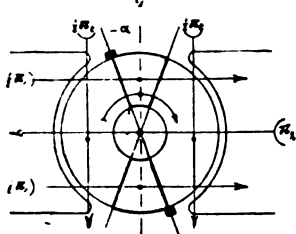


Fig. 1d.

Dynamo.

Moteur.

de la machine, le courant inducteur est inverse dans la dynamo et direct dans le moteur, la force électromotrice due au flux engendré par ce courant est directe dans la dynamo et inverse dans le moteur. En outre, le sens de rotation étant le même, les balais doivent être calés en avant du plan neutre dans la dynamo et en arrière dans le moteur, pour amoindrir les étincelles au collecteur. Supposons que le décalage soit $+\alpha$ dans le premier cas et $-\alpha$ dans le second. Le plan contenant les lignes d'appui des balais contre le collecteur et son symétrique par rapport au plan neutre, partagent l'induit en quatre parties. En modifiant légèrement l'hypothèse de Swinburne, on peut dire que les enroulements qui se trouvent sur les deux parties en regard des pièces polaires, engendrent le flux transversal. Dans ces deux régions, d'amplitude angulaire $\pi - 2\alpha$, le courant a le même sens, soit que la machine fonctionne comme dynamo, soit qu'elle fonctionne comme moteur; le flux transversal ne change donc pas de direction. On peut dire encore que les enroulements qui se trouvent sur les deux parties contenant le plan neutre, engendrent un flux longitudinal. Dans ces deux régions, d'amplitude angulaire 2α , le courant change de sens selon que la machine fonctionne comme dynamo ou comme moteur; ce flux longitudinal change donc de direction dans les deux cas, tout comme le flux engendré dans les inducteurs; c'est donc vraiment un flux antagoniste aussi bien dans le moteur que dans la dynamo. La force électromotrice vraie est donc en tous cas la différence entre la force électromotrice due à l'action des inducteurs et la force électromotrice due à la réaction de l'induit.

§ 3. — Il est utile de voir comment la réaction de l'induit e_1 varie avec le courant d'armature. Ce courant produit une force contre-magnétomotrice qui

s'exprime ordinairement, pour une machine bipolaire, par

$$4 \mathfrak{R} \cdot \frac{\alpha n_1}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{i_1}{2} = 2 \alpha n_1 i_1$$

où n_1 est le nombre de fils utiles enveloppant l'armature, et qui occasionne une diminution du flux $\mathfrak{R}$, dépendant de la valeur de $\mathfrak{R}$ même, puisque la réluctance du circuit magnétique de la machine (fonction de la perméabilité) dépend de la valeur momentanée de $\mathfrak{R}$. Comme la force magnétomotrice du courant parcourant les inducteurs s'exprime par $4\pi \cdot n_2 \cdot i_2$, où n_2 est le nombre des spires enveloppant les inducteurs, la présence du courant i_1 dans l'armature, équivaut à une diminution Δi_2 du courant i_2 dans les inducteurs, qu'on peut calculer par la formule

$$4 \pi n_2 \Delta i_2 = 2 \alpha n_1 i_1$$

d'où :

$$\Delta i_2 = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{n_1}{n_2} i_1.$$

Si l'on connaît donc la caractéristique principale $e_2 = f(i_2)$, la réaction d'induit e_1 peut être représentée par la diminution d'ordonnée de la courbe correspondant à une diminution Δi_2 de l'abscisse. On peut alors obtenir la force électromotrice vraie e par la construction de la fig. 2. On voit que la réaction d'armature varie avec la valeur momentanée du courant dans les inducteurs.

Mais on peut s'épargner de faire le calcul de Δi_2 pour chaque valeur de i_1 en traçant une autre courbe de la caractéristique principale, avec la même échelle pour les ordonnées mais en amplifiant les abscisses dans le rapport $\frac{2\pi n_2}{\alpha n_1}$. On recherche alors la diminution d'ordonnée de la nouvelle courbe, pour une diminution i_1 de l'abscisse, en

partant du point qui a pour ordonnée la valeur de la force électromotrice e_2 , due aux inducteurs, dans les conditions momentanées que l'on considère. On voit que quelles que soient ces conditions, la réaction d'armature croît plus vite que le courant i_1 . Cette accélération n'est pas considérable si la machine fonctionne au-delà du coude de la caractéristique principale; elle est plus sensible si la machine fonctionne en-deça de ce coude. Mais dans les machines en dérivation bien construites on ne commettra jamais de trop grandes erreurs en supposant que cette accélération de la réaction par rapport au courant d'armature n'existe pas; supposant ainsi que la réaction d'armature e_1 soit simplement proportionnelle au courant i_1 , on pourra poser: $e_1 = \rho i_1$, où ρ sera homogène avec une résistance. Graphiquement ρ , aussi bien qu'une résistance quelconque, sera représenté par le paramètre de direction ou coefficient angulaire d'une droite; ρ mesurera l'inclinaison moyenne de la courbe, déduite tantôt de la caractéristique principale, dans la région plus utilisée pendant le fonctionnement de la machine; je lui donnerai le nom d'*indice de réaction de l'armature*.

Ainsi on pourra mesurer graphiquement la chute de potentiel dans l'armature de la dynamo, due au courant i_1 parcourant la résistance r_1 et à la réaction d'induit e_1 , en construisant un triangle rectangle ayant pour cathète i_1 et pour angle adjacent l'angle qui a pour tangente $r_1 + \rho = R$, car dans la dynamo, e_1 est contraire à i_1 ; on pourra mesurer de la même manière, la même grandeur dans le moteur, en construisant un triangle rectangle ayant la même cathète, mais ayant pour angle adjacent l'angle qui a pour tangente $r_1 - \rho = R$, car dans le moteur e_1 a la même direction que i_1 . La chute de potentiel Δv cherchée sera représentée par la cathète opposée.

Comme l'inclinaison moyenne φ de la courbe sur laquelle on devrait mesurer à rigueur la réaction de l'induit, croît quand le rapport $\frac{2\pi n_2}{2n_1}$ diminue, on voit que ce paramètre φ devra être pris proportionnel à α .

On verra maintenant que de la seule caractéristique à circuit ouvert ou principale, dont on peut faire le tracé par la méthode de Hopkinson pendant la construction de la machine, on peut déduire toutes les autres caractéristiques, pourvu que l'on connaisse les résistances de l'enroulement des inducteurs et de l'induit et que l'on déduise le paramètre ρ , de la courbe principale, de la manière indiquée plus haut.

§ 4 — Considérons donc une dynamo en dérivation maintenue à la vitesse constante N . Soit $O\epsilon$ (fig. 3) la caractéristique principale à cette vitesse.

Traçons trois droites OP , OQ , et OR ayant les paramètres de direction r_1 , $r_1 + \rho$, et r_2 . Dans ce but, on fixe sur l'axe $O\epsilon$ le point A éloigné de O de l'unité adoptée pour représenter les courants, on trace la droite AB parallèle à l'axe $O\epsilon$, et on prend sur cette droite, à partir du point A , trois segments AP , AQ , et AR , valant respectivement r_1 , $r_1 + \rho$, et r_2 dans l'échelle adoptée pour représenter les f. e. m. (forces électro-motrices) et les d. d. p. (différences de potentiel).

J'indiquerai ces trois droites par leurs coefficients angulaires r_1 , $r_1 + \rho$, et r_2 .

On a les relations :

$$\begin{cases} v = (e_2 - e_1) - r_1 i_1 = r_2 i_2 = r i \\ i = i_1 - i_2; e = e_2 - e_1; c_1 = \rho i_1 \end{cases}$$

Il importe de faire remarquer que si l'on suppose connues les 3 résistances r_2 , r_1 , r et l'indice de réaction ,

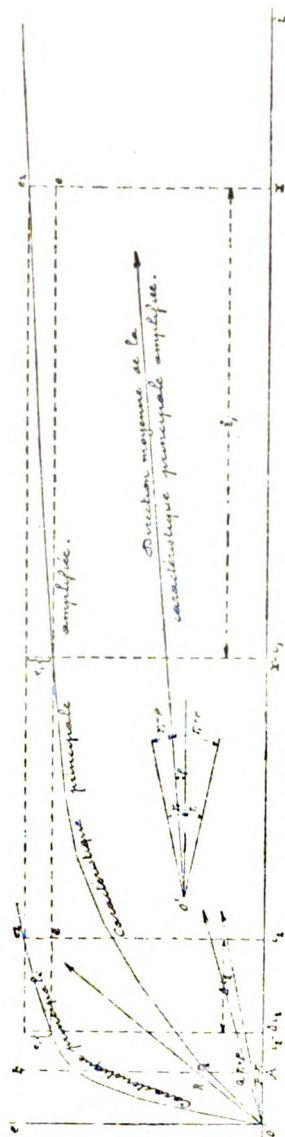


Fig. 2.



Fig. 3.

on a là 6 équations linéaires homogènes par rapport aux 7 variables $e_2, e_1, e, v, i_2, i_1, i$. Le système serait indéterminé sans la connaissance d'une septième relation. Cette septième relation se présente dans la caractéristique principale $e_2 = f(i_2)$. Mais le système a évidemment des propriétés indépendantes de cette dernière relation qui n'est pas linéaire comme les autres. Nous en rencontrons deux assez importantes.

Supposons maintenant que dans une certaine condition de fonctionnement le courant dans les inducteurs soit i_2 . Si l'on prend $OA = i_2$ et l'on trace AB parallèle à Oo on détermine un point B sur la courbe Oe et un point C sur la droite r_2 . On a alors :

$$AB = e_2, AC = r_2 i_2 = v, BC = e_2 - v = e_1 + r_1 i_1 = (r_1 + \rho) i_1.$$

Si l'on trace maintenant de C une parallèle à Oi et de B une parallèle à $r_1 + \rho$, on détermine un point D ayant pour abscisse OE et pour ordonnée ED . Comme on a $BC = (r_1 + \rho) i_1$, CD , il résulte

$$AE = CD = \frac{BC}{r_1 + \rho} = i_1$$

et

$$OE = AE - OA = i_1 - i_2 = i$$

tandis que

$$ED = AC = v.$$

Le point D est donc un point de la courbe $v = f(i)$ (*) que l'on pourrait tracer par points en partant de diffé-

(*) Je représenterai avec le même symbole f des fonctions différentes pour ne pas multiplier des notations qui n'ont aucune importance.

rentes valeurs de i_2 . Cette courbe est la caractéristique extérieure de la machine, dessinée à la gauche de l'axe Oe . Si l'on trace à présent de D une parallèle à r_1 , on détermine un point F sur la droite AB, tel que

$$AF = AC + CF = v + r_1 i_1 = e_2 - e_1 = e.$$

Le point F est donc un point de la courbe $e = f(i_2)$ que l'on tracerait aisément par points.

On pourrait encore tracer la courbe $e = f(i)$ en déterminant chaque fois le point G ayant la même ordonnée que F et la même abscisse que D, et les courbes $e = f(i_1)$ et $v = f(i_1)$, en déterminant ensuite les points H et K sur le prolongement de FG et de CD, à une distance HG et DK égale à OA.

La courbe $e = f(i)$ est la caractéristique totale de la machine. Mais ces trois dernières courbes n'ont pas la même importance que la caractéristique extérieure.

On pourrait encore envisager la droite r_2 , lieu des points C, comme une ligne représentant $v = f(i_2)$.

Si l'on considère le rayon vecteur OD allant de l'origine des axes à un point de la caractéristique extérieure, on voit que son paramètre de direction est, en valeur absolue, $\frac{v}{i} = r$, résistance du circuit extérieur.

Le procédé nous donne donc tous les renseignements voulus car on peut trouver n'importe quelle f. e. m. ou d. d. p. sous forme d'ordonnée ou de différence entre deux ordonnées, n'importe quel courant sous forme d'abscisse ou de différence entre deux abscisses, n'importe quelle résistance sous forme de paramètre directeur ou de différence entre deux paramètres directeurs.

Mais la méthode est encore plus féconde, elle nous fournit, sous forme d'aire ou de différence entre deux

aires, n'importe quelle puissance électrique que l'on veuille envisager. En effet, si l'on indique par la lettre I le point où la droite CD coupe l'axe Oc , on trouve :

Aire $AFGE = \overline{AF} \times \overline{AE} = e i_1 = W$: puissance électrique totale développée dans l'induit ;

Aire $OACI = \overline{AC} \times \overline{OA} = v i_2 = r_2 i_2 = w_2$: puissance électrique dépensée en effet joule dans les inducteurs ;

Aire $CFGD = \overline{CF} \times \overline{AE} = (e - v) i_1 = r_1 i_1 = w_1$: puissance électrique dépensée en effet joule dans l'induit ;

Aire $OIDE = \overline{OI} \times \overline{OE} = v i = w$: puissance électrique fournie au circuit extérieur. On voit bien que $w = W - w_1 - w_2$.

Le tableau des renseignements est donc au complet, et le rendement électrique $\eta = \frac{w}{W}$ de la dynamo est donné par le rapport de l'aire $OIDE$ à l'aire $AFGE$.

On peut encore procéder différemment et partir par exemple de la valeur de la résistance extérieure et déduire tous les éléments correspondant à cette résistance.

Il suffit pour cela de déterminer le point de la caractéristique principale correspondant au fonctionnement de la machine alimentant cette résistance. Dans ce but, on trace la droite dont le paramètre de direction est r par rapport à la partie de l'axe $O i$ qui se trouve à la gauche ; on choisit un point quelconque L de cette droite ; on tire du point L une droite parallèle à $O i$ jusqu'à son intersection en un point M avec Or_2 ; on tire encore du même point L une droite parallèle à la droite $O (r_1 + r)$ jusqu'à rencontrer en un point N l'ordonnée qui passe par le point M . La droite ONR rencontre la caractéristique $e_2 = f(i_2)$ en un point B qui correspond au fonctionnement de la machine sur une résistance extérieure r .

Au moyen du point B on retrouve comme précédemment les points correspondants sur les différentes caractéristiques, l'auxiliaire $e = f(i_2)$, l'extérieure $v = f(i)$ et la totale $e = f(i)$.

J'indiquerai la droite OR, correspondant à la droite O r , sous le nom de rayon vecteur R.

On pourra déterminer le point extrême utile de la caractéristique principale, en appliquant la construction indiquée ci-dessus à la droite O e qui prend la place de la droite O r quand la résistance extérieure est infinie (circuit ouvert).

On pourra déterminer la valeur de la plus petite résistance que doit avoir le circuit extérieur pour que la machine ne cesse pas de fonctionner à la vitesse voulue (résistance d'amorcement) en considérant comme vecteur R la tangente en O à la caractéristique principale.

On remarquera que le faisceau des rayons vecteurs R est projectif avec le faisceau des droites représentant la résistance extérieure r .

Si l'on donne à la caractéristique principale la forme O ε bien connue, assez proche à une hyperbole, ou bien formée, si l'on veut, de deux traits presque rectilignes, le premier à coefficient angulaire plus ou moins *grand*, le second à coefficient angulaire plus ou moins *petit*, raccordé par un arc de rayon plus ou moins *restreint*, selon que la reluctance du circuit magnétique de la machine est plus ou moins *faible*, on trouve que les courbes $e = f(i_2)$, $e = f(i)$, $v = f(i)$, ont les formes représentées dans la figure 3, tout à fait semblables à celles que l'on obtient dans les essais directs. Leur détermination géométrique n'est faussée que par l'erreur qui se glisse dans la réaction de l'induit, puisque les lignes comme BD de la figure 3 ne devraient pas être rectilignes mais légèrement courbes, comme nous avons déjà vu

Si la caractéristique principale était vraiment une hyperbole, ces trois autres courbes seraient aussi des hyperboles ; si elle se composait au contraire de deux segments de droite et d'un arc de cercle, ces trois autres courbes se composeraient de deux segments de droite et d'un arc de conique, car elles se déduisent par des opérations projectives (*).

§ 5. — Au moyen de ces courbes, je passe maintenant à l'étude du fonctionnement de la dynamo, à une vitesse constante, en supposant que la résistance r du circuit extérieur varie de ∞ à 0.

Quand le circuit extérieur est ouvert ($r = \infty$) la machine s'amorce avec toute facilité, puisque la courbe $v = f(i)$ a un point sur l'axe Oe , qui, ayant comme paramètre de direction ∞ , représente précisément la résistance du circuit extérieur dans ce cas. Un même courant parcourt alors l'induit et les inducteurs. A cause de la petitesse de r_1 et de r , dans une machine bien construite, la chute de potentiel et la réaction dans l'induit sont minimales, et la d. d. p. aux bornes diffère très peu de la valeur de l'ordonnée du point où la droite r_2 rencontre la caractéristique principale Oe . Toutefois une petite différence (très exagérée dans la figure) existe toujours, le triangle se_2v ne pouvant pas disparaître à la rigueur.

(*) Il est à remarquer que toutes les figures qui accompagnent ces recherches ne sont pas proportionnées selon des données pratiques. On a toujours exagéré les angles représentant r_1 et r et on a diminué les inclinaisons de r_2 et de la tangente en O à la caractéristique principale pour avoir des figures compréhensibles et pas trop longues. Il en résulte que les aires représentant les pertes par effet joule dans l'induit et dans les inducteurs sont toutes exagérées. Mais ce détail ne change aucunement les déductions que la méthode permet de faire aisément.

Si l'on ferme le circuit extérieur sur une résistance très grande que l'on fait décroître progressivement, l'induit engendre un courant i_1 croissant, qui se partage dans un courant inducteur i_2 décroissant et un courant i extérieur croissant plus rapidement que le courant i_1 . En même temps la f. e. m. vraie de la machine diminue, et la d. d. p. aux bornes diminue encore plus vite, à cause de la réaction d'induit et de la chute de potentiel qui augmentent avec le courant d'armature.

Les choses procèdent ainsi jusqu'à un certain point pour lequel le courant i_1 engendré par l'armature est maximum (tangente à $v = f(i)$ parallèle à r_2). Peu après c'est le courant extérieur i qui est maximum (tangente à $v = f(i)$ parallèle à Oe). Ces conditions se vérifient quand la machine travaille à une aimantation correspondant au coude de la courbe Oe .

Ensuite, tous les éléments à considérer diminuent ensemble. A cause de la continuelle diminution de i_2 , i_1 diminue plus vite que i , et partant la chute de potentiel et la réaction de l'armature décroissent rapidement; mais comme la f. e. m. e_2 due aux inducteurs décroît encore plus rapidement, la d. d. p. aux bornes s'amointrit jusqu'à s'annuler.

Il est à remarquer que toutes ces variations sont très rapides par rapport à la variation de la résistance extérieure; il s'ensuit que dans ces conditions le fonctionnement de la machine est très instable; aussi on ne se sert jamais d'une machine qui a un fonctionnement correspondant à la branche supérieure de la courbe $v = f(i)$. Mais il y a plus; le courant extérieur et la d. d. p. aux bornes s'annulent pour une valeur $r^{(c)}$, de la résistance extérieure qui n'est pas nulle; la tangente à $v = f(i)$ en O , dont le coefficient angulaire représente $r^{(c)}$, s'obtient de la tangente Ot à la courbe caractéristique $e_2 = f(i_2)$ en O ,

par la même construction qui permet de déduire la première courbe de la seconde.

Ceci signifie que la machine ne peut fonctionner ni en court-circuit ni pour des résistances extérieures trop petites : elle se désamorce pour une diminution excessive de la résistance extérieure. De même, si on procède par augmentation de cette résistance, la machine ne s'amorce pas pour une valeur inférieure à $r^{(1)}$, qui prend le nom de résistance d'amorçement.

Quant à la puissance électrique totale fournie par la machine, qui n'est d'abord que la somme des deux puissances perdues par effet joule dans l'induit et dans l'inducteur, elle augmente progressivement pendant que la résistance extérieure diminue, jusqu'à un maximum qui se présente avant le fonctionnement au coude de la caractéristique principale; puis elle décroît lentement et, atteignant le coude, elle diminue ensuite très rapidement.

Evidemment la perte par effet joule dans les inducteurs décroît continuellement, comme le courant inducteur, mais plus rapidement que celui-ci.

De même la perte par effet joule dans l'induit, suit, avec plus de brusquerie, la loi de variation du courant engendré dans l'induit; elle augmente donc progressivement jusqu'au coude pour diminuer ensuite très rapidement.

Quant à la puissance électrique recueillie sur le circuit extérieur, et qui représente l'excès de la puissance électrique totale sur les pertes dans les enroulements de l'induit et des inducteurs, elle part d'une valeur nulle, croît rapidement jusqu'à un maximum qui se présente un peu après le maximum de la puissance totale et diminue ensuite avec une rapidité croissante.

Pendant que la résistance extérieure diminue, le rendement électrique $\eta = \frac{v}{c} \times \frac{i}{i_1} = \frac{c - r i_1}{c} \frac{i_1 - i_2}{i_1}$ croît

d'abord rapidement, puis lentement jusqu'à un maximum qui se présente un peu après les deux maximums de la puissance totale $W = e i_1$ et de la puissance utile $w = vi$, mais encore avant le fonctionnement au coude de la caractéristique à circuit ouvert. Il diminue ensuite, d'abord lentement, puis rapidement, dans la période du fonctionnement instable

§ 6 — La méthode se prête très bien, en outre, à étudier le fonctionnement de la machine ayant une caractéristique principale, une réaction et des résistances données, à discuter les dimensions à donner à la machine et à suggérer les moyens de réglage.

Quatre choses principales sont à rechercher dans le fonctionnement d'une dynamo en dérivation :

1° La constance de la différence de potentiel aux bornes; c'est-à-dire l'élévation à peu près uniforme de la branche de la caractéristique où le fonctionnement est stable et fournit une puissance suffisante avec un bon rendement ;

2° Un assez grand débit; c'est-à-dire une étendue suffisante de cette même branche ;

3° Un bon rendement dans la partie plus utile de cette branche; c'est-à-dire les plus grandes valeurs possibles pour les rapports $\frac{v}{e}$ et $\frac{i}{i_1}$; ou bien les moindres pertes $r_1 i_1^2$ et $r_2 i_2^2$;

4° Une résistance d'amorcement assez petite; c'est-à-dire une tangente à la caractéristique extérieure, à l'origine des axes, faisant un angle très petit avec l'axe Oi .

On peut faire varier ces éléments en faisant varier les éléments suivants :

1° La résistance du circuit magnétique; c'est-à-dire la forme de la caractéristique principale ;

2° La vitesse normale de fonctionnement; c'est-à-dire l'échelle des ordonnées de cette courbe ;

3° La réaction des balais et la résistance de l'induit; c'est à dire l'inclinaison de certaines droites de construction : r_1 et $r_1 + \rho$;

4° La résistance de l'enroulement inducteur; c'est-à-dire l'inclinaison de la droite de construction r_2 .

§ 7. — La fig. 4 indique les effets de la différence de la réluctance du circuit magnétique de la dynamo.

$e_2 = f(i_2)$ est la caractéristique à circuit ouvert d'une dynamo à grande réluctance R ; $e'_2 = f(i_2)$ est la caractéristique principale d'une autre dynamo ayant les mêmes résistances dans les inducteurs et dans l'induit, et le même indice de réaction d'armature, mais ayant une réluctance moindre R' ; cette seconde caractéristique est entièrement supérieure à la première.

On en déduit deux caractéristiques auxiliaires $e = f(i_2)$ et $e' = f(i_2)$ dont la seconde est aussi entièrement supérieure à la première; deux caractéristiques extérieures $v = f(i)$ et $v' = f(i)$ dont la seconde renferme entièrement la première; et deux caractéristiques totales $e = f(i)$ et $e' = f(i)$ dont la seconde s'étend également beaucoup plus que la première.

On remarquera que j'ai choisi deux caractéristiques $e_2 = f(i_2)$ aboutissant à un même point Z pour pouvoir supposer la même valeur moyenne dans les deux cas, à l'indice de réaction de l'induit. La partie vraiment utilisée de la caractéristique correspondant à la plus petite réluctance a effectivement une inclinaison moyenne plus petite: en tenant compte de cette circonstance, les différences auraient été encore plus nuisibles dans le même sens.

Il s'ensuit, qu'abstraction faite de la limitation qui dérive de l'échauffement, la machine de moindre réluctance est capable de débiter un courant beaucoup plus intense que la machine de réluctance plus élevée; en même

temps, elle demande une résistance d'amorçement plus faible pour la même vitesse; en outre, elle fournit une différence de potentiel aux bornes qui descend moins rapidement et qui est toujours plus grande que celle fournie par la seconde machine, pour une même résistance extérieure. Son rendement électrique, pour une résistance extérieure donnée, est peut-être aussi quelque peu supérieur à celui de la machine à plus forte réluctance, mais à cet égard, l'avantage n'est pas grand.

Ces résultats préconisent une régulation du potentiel aux bornes et du débit, en produisant des variations dans la réluctance du circuit magnétique de la dynamo, par le déplacement d'un coin de fer placé, par exemple, dans la culasse de l'inducteur.

§ 8. — La figure 5 *a* indique les effets de la différence de la vitesse de rotation de l'armature de la dynamo.

On sait que la f. e. m. engendrée par un flux inducteur indépendant, dans l'induit d'une dynamo, est directement et exactement proportionnelle à la vitesse de rotation de cet induit. Si l'on a donc la caractéristique principale $e_2 f(i_2)$ de la dynamo tournant à la vitesse N tours par seconde, on obtient la caractéristique à circuit ouvert $e'_2 = f(i'_2)$ de la même dynamo tournant à la vitesse de N' tours par seconde, en multipliant les seules ordonnées de la première courbe par le rapport $N' : N$.

C'est ainsi qu'on a fait dans la figure indiquée, et on a ensuite déduit les deux caractéristiques auxiliaires $e = f(i_2)$ et $e' = f(i_2)$. Si $N' > N$, de ces caractéristiques, comme des deux précédentes, la seconde est entièrement au-dessus de la première. Partant, des deux caractéristiques extérieures $v = f(i)$ et $v' f(i)$ et des deux caractéristiques totales $e = f(i)$ et $e' f(i)$, toujours la seconde renferme complètement la première, c'est à dire la seconde a

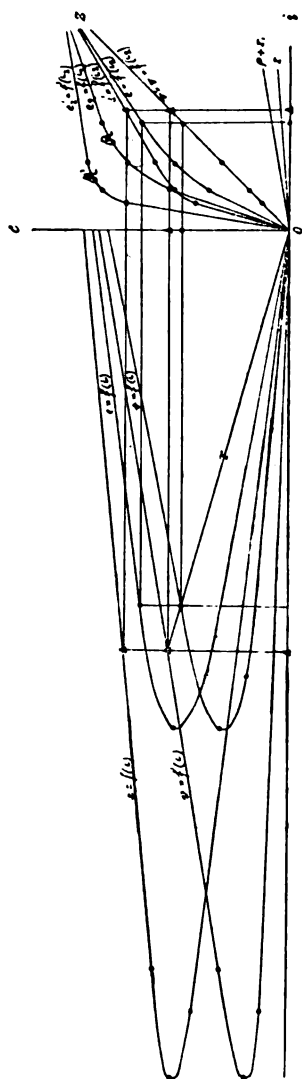


Fig. 4.

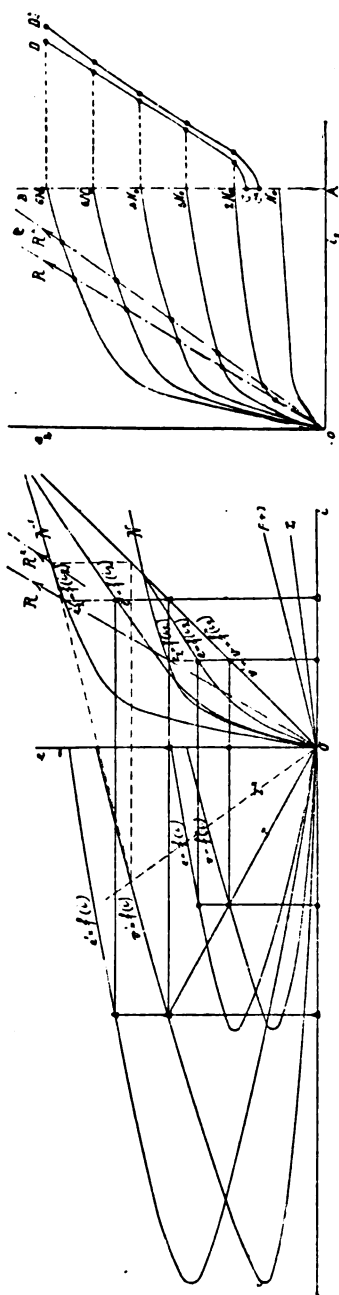


Fig. 5a.

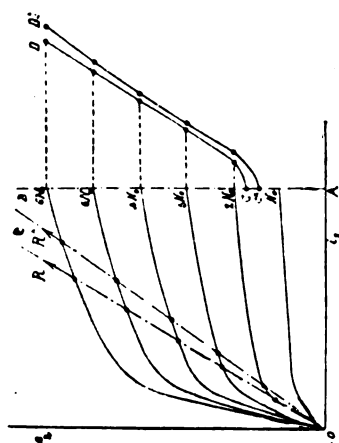


Fig. 5b.

la branche correspondante au fonctionnement stable plus haut placée, et la branche correspondante au fonctionnement instable plus inclinée que la première.

Il s'ensuit qu'un accroissement de la vitesse, produit une augmentation de la différence de potentiel aux bornes, et partant du débit ; mais l'inclinaison de la branche utile, c'est à dire la diminution du potentiel par rapport à l'augmentation du courant, ne varie pas sensiblement avec la vitesse : elle est toujours la même pour une même résistance extérieure comme on comprendra tantôt. Quant à la résistance d'amorcement, comme il est facile de voir, elle diminue quand la vitesse augmente.

J'ai fait remarquer que les équations

$$\begin{aligned} v &= (e_2 - e_1) - r_1 i_1 = e_2 - (\varphi + r_1) i_1 = r_2 i_2 = r i \\ e &= e_2 - e_1 & i &= i_1 - i_2 & e_1 &= \varphi i_1 \end{aligned}$$

sont linéaires et homogènes par rapport à v, e, e_1, e_2 et i, i_1, i_2 , pourvu que l'on suppose r constant comme r_1, φ, r_2 .

Si donc elles admettent une certaine solution :

$$e_2, e_1, e, v, i_2, i, i_1,$$

elles admettent aussi l'autre solution :

$$ke_2, ke_1, ke, kv, ki_2, ki, ki_1.$$

Cette circonstance se produit en pratique, en faisant changer la vitesse pendant que la résistance du circuit d'utilisation reste invariable. Seulement, le coefficient k n'est pas le rapport de variation de la vitesse. Si l'on examine la figure 5a, on voit que k est, si l'on veut, le rapport de deux rayons vecteurs superposés allant de l'origine aux points des deux caractéristiques principales, qui correspondent au fonctionnement avec une même

résistance extérieure. Or, ce sont les ordonnées de ces caractéristiques, et non pas les rayons vecteurs, qui varient proportionnellement à la vitesse.

Voici donc une première propriété indépendante de la forme de la caractéristique principale.

Inutile de dire que, dans les circonstances indiquées, le rendement électrique $\frac{ei_1}{vi}$ de la machine est indépendant de la vitesse de rotation.

La direction du vecteur OR indiquant les points des caractéristiques à circuit ouvert correspondants à une résistance extérieure donnée r , se trouve, comme on l'a vu, en traçant par un point quelconque de la droite Or , une droite parallèle à Oi jusqu'à couper la droite Or_2 , et une droite parallèle à $O(z + r_1)$ jusqu'à rencontrer l'ordonnée passant par l'intersection précédente ; cette nouvelle intersection doit se trouver sur OR. Ce vecteur, dont la construction est indépendante de la forme de la caractéristique principale, passe donc d'une direction extrême, proche à Or_2 , à la direction Oe , si la direction de Or passe de Oe à Oi (vers la gauche), c'est à dire si r varie de ∞ à 0.

Si l'on trace les caractéristiques principales correspondant aux vitesses $N_0, 2N_0, 3N_0, 4N_0, 5N_0, 6N_0$, etc., et le vecteur OR (figures 5b) ; si ensuite on prend ces vitesses comme ordonnées, par exemple, et on prend les longueurs coupées par les caractéristiques sur ce vecteur comme abscisses, on trouve la loi de variation du coefficient k par rapport aux variations de la vitesse représentée par une courbe CD. Il en existe une pour chaque résistance extérieure.

Celle-ci fixée, supposons que la vitesse parte de zéro et augmente continuellement. On trouve que k est nul jusqu'à une certaine valeur de N d'autant plus grande que la résistance extérieure considérée est plus petite ; ce qui

signifie que l'amorcement de la machine ne peut pas se faire aux plus petites vitesses, mais qu'il est d'autant plus facile que la résistance extérieure est plus grande. Mais à peine la machine a atteint une vitesse suffisante à l'amorcement, k prend une valeur qui croît d'abord très rapidement. Partant le voltage et le débit acquièrent assez vite des valeurs sensibles. Ceci arrive pendant que le point utilisé de la caractéristique instantanée s'avance vers le coude. Ensuite, k varie d'une manière plus uniforme, et tandis que le rapport $k : N$ augmente continuellement, le rapport des variations $\Delta k : \Delta N$ est sensiblement constant (la courbe a une allure rectiligne).

Si on choisit une résistance $r^* > r$, on obtient un rayon vecteur R^* plus éloigné de Oe que le vecteur R , et une courbe $C^* D^*$ plus ample que CD ; tous les éléments e , v , i , etc., ont donc alors aux mêmes vitesses des valeurs plus grandes que dans le cas précédent.

§ 9. — La fig. 6 indique les effets de la différente résistance de l'enroulement des inducteurs de la machine, en y comprenant naturellement la résistance du rhéostat de champ.

$e_2 = f(i_2)$ est comme toujours la caractéristique principale; Or_2 est une droite représentant une certaine résistance des inducteurs r_2 , en même temps la loi $v = f(i_2) = r_2 i_2$; Or'_2 est une droite supposant la résistance des inducteurs un peu moindre.

On en déduit deux caractéristiques auxiliaires $e = f(i_2)$ et $e = f(i_2)$ dont la seconde est entièrement inférieure à la première; mais cette fois c'est à la caractéristique inférieure que correspondent une caractéristique extérieure $v' = f(i)$ et une caractéristique totale $e = f(i)$ renfermant entièrement les caractéristiques de même nom correspondant à l'autre caractéristique auxiliaire.

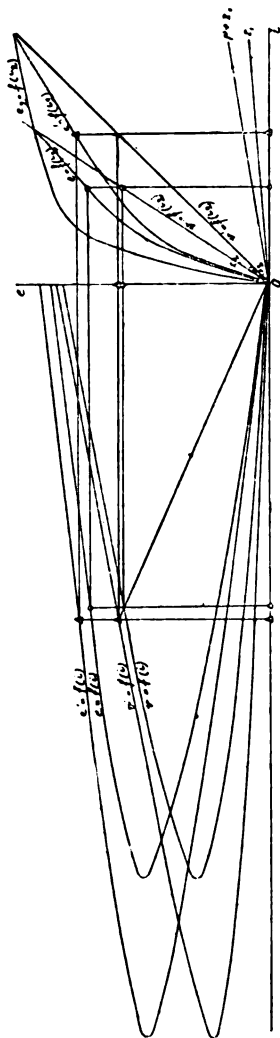


Fig. 6.

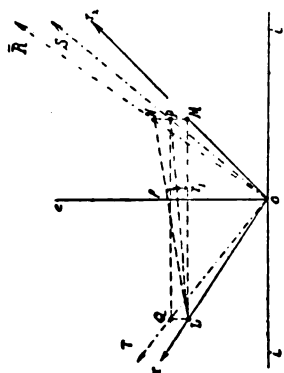


Fig. 8b.

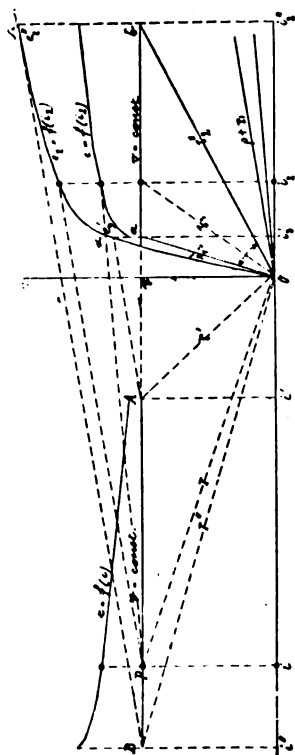


Fig. 7.

Il s'ensuit que c'est avec une résistance plus petite dans le circuit des inducteurs, que la dynamo peut fournir un courant extérieur plus intense; dans les mêmes conditions, la différence de potentiel aux bornes est plus élevée pour une même résistance extérieure, mais le décrétement du voltage reste à peu près le même par rapport à l'augmentation du débit; quant au rendement électrique, il est amélioré, à égalité de résistance extérieure, par la diminution de la résistance r_2 ; et la résistance $r(0)$ nécessaire à l'amorçement avec la vitesse voulue, diminue en même temps que r_2 .

Si un rhéostat de champ est placé en série avec l'enroulement des inducteurs, on peut donc régler la différence de potentiel aux bornes de la machine et la tenir constante, tandis que la résistance extérieure varie dans des limites assez étendues, pourvu qu'on puisse produire une diminution de résistance suffisante dans le circuit dérivé d'excitation.

On voit que si l'on part de la valeur minimum de r_2 et de la caractéristique extérieure $v = f(i)$ la plus étendue on peut faire de façon en augmentant progressivement r_2 , que la caractéristique se rétrécisse continuellement et balaye toute la surface contenue entre sa position primitive et l'axe Oe . En réglant r_2 on peut donc faire passer la caractéristique extérieure par un point arbitraire de la région du plan (v, i) contenue dans la caractéristique extérieure la plus étendue.

En d'autres termes, on peut obtenir que la machine travaille sur une résistance extérieure arbitraire, avec un voltage aux bornes aussi arbitraire, pourvu qu'il ne soit pas excessif, en débitant le courant qui est indiqué par la loi de Ohm; et cela tout en laissant invariable la vitesse de rotation de la machine, c'est à dire tout en utilisant une caractéristique principale donnée $e_2 = f(i_2)$.

Pour déterminer graphiquement quelle est la résistance totale à donner dans ce but à la dérivation d'excitation, on procède ainsi (fig. 7) :

Du point P, par lequel on veut faire passer la caractéristique extérieure, on tire une droite parallèle à O ($r_1 + r$) et on détermine son intersection avec la caractéristique principale; de cette intersection on abaisse une ordonnée de manière à couper une autre droite partant de P et parallèle à Oi; on a ainsi une intersection par laquelle passe encore la droite Or_2 , dont le paramètre de direction résout le problème.

De la même manière peut-on déterminer la résistance que doit comprendre le rhéostat de champ, afin qu'on puisse obtenir par lui un voltage constant v aux bornes, entre les débits extrêmes i' et i'' , c'est à dire tandis que la résistance extérieure varie de r' à r'' (fig. 7).

Si l'on veut donc que AB soit la caractéristique extérieure obtenue par un réglage continu, on répète pour les points extrêmes A et B la construction faite pour le point P et on obtient les droites Or_2' et Or_2'' représentant par leur paramètre de direction, les deux valeurs extrêmes de la résistance du circuit d'excitation. La plus petite de ces valeurs ne doit pas être inférieure à la résistance propre de l'enroulement; la différence entre ces deux valeurs indique la résistance à donner au rhéostat de champ. La figure indique encore les lois de variation de la force électromotrice vraie e avec le courant inducteur i_2 et avec le courant extérieur i , quand la différence de potentiel aux bornes est réellement maintenue constante par le réglage.

§ 10. — La figure 8 *a* indique les effets de la variation de la résistance de l'enroulement de l'induit et de celle de l'indice de réaction d'armature.

$e_2 = f(i_2)$ est comme toujours la caractéristique principale de la machine à la vitesse N .

En se donnant une certaine valeur de r_1 et de ρ , représentées par les tangentes des angles ayant le sommet en O , on obtient la caractéristique auxiliaire $e = f(i_2)$, la caractéristique extérieure $v = f(i)$ et la caractéristique totale $e = f(i)$.

Si l'on se donne ensuite $r_1' > r_1$ et $\rho' = \rho$, représentées par les tangentes des angles dont le sommet est en O' , on obtient la caractéristique auxiliaire $e' = f(i_2)$ toute au-dessus de $e = f(i_2)$, la caractéristique extérieure $v' = f(i)$ plus restreinte et beaucoup moins élevée que $v = f(i)$, et la caractéristique totale $e' = f(i)$ plus restreinte mais ayant à peu près la même hauteur que $e = f(i)$.

Si l'on se donne finalement $r_1'' = r_1$ et $\rho'' > \rho$, représentées par les tangentes des angles ayant le sommet en O'' , on obtient la caractéristique auxiliaire $e'' = f(i_2)$ toute au-dessous de $e = f(i_2)$, la caractéristique extérieure $v'' = f(i)$ plus restreinte et beaucoup moins élevée que $v = f(i)$, et la caractéristique totale $e'' = f(i)$ plus restreinte et aussi moins élevée que $e = f(i)$.

Si l'on fait de façon que $r_1' + \rho' = r_1'' + \rho''$ les deux caractéristiques extérieures viennent à coïncider, comme c'est le cas de la figure 8, c'est à dire $v'' = v' = f(i)$.

On voit par là que la forme et l'étendue de la caractéristique extérieure dépend exclusivement de la valeur de $r_1 + \rho$. Plus cette valeur est petite, plus grand est le débit possible, moindres sont les diminutions du voltage dans la branche supérieure, moindre est la résistance d'amorcement. Quant à la caractéristique totale, elle est d'autant moins élevée, et partant le rendement électrique de la machine est meilleur que la valeur de r_1 est plus petite.

Si en correspondance de la droite représentant la résistance extérieure r (fig. 8 b) on considère, non plus le

vecteur R qui se rend de l'origine O au point correspondant de la caractéristique principale $e_2 = f(i_2)$, mais le vecteur S qui se rend au point correspondant de la caractéristique auxiliaire $e = f(i_2)$ et le vecteur T qui se rend au point correspondant de la caractéristique totale $e = f(i)$, on voit que ces deux vecteurs, dont la recherche est indépendante de l'indice de réaction et de la forme de la caractéristique principale, forment encore deux faisceaux projectifs avec le faisceau des droites comme Or. Mais, chose plus importante, ils permettent de déduire de la figure, qu'à résistance extérieure r égale, le rendement électrique $\frac{vi}{ei_1}$ de la machine est indépendant de l'indice de réaction de l'induit, c'est à dire de l'angle de calage des balais. Dans ce cas encore on a

$$\frac{e}{e''} = \frac{v}{v''} = \frac{i_2}{i_2''} = \frac{i}{i''} = \frac{i_1}{i_1''}.$$

Mais la même proportionalité n'existe pas entre e_2 et e_2'' , ni entre e_1 et e_1'' à cause de la différence supposée entre ρ et ρ'' . Le rapport de proportionnalité est maintenant le rapport entre les segments interceptés sur le vecteur S par les deux caractéristiques auxiliaires, ou bien entre les segments interceptés sur le vecteur T par les deux caractéristiques totales.

L'homogénéité des relations

$$v = e - r_1 i_1 = r_2 i_2 = r i_1 = i_2 + i$$

nous faisait prévoir que le cas que je viens de considérer (et qui constitue une deuxième propriété indépendante de la forme de la caractéristique principale), devait bien se présenter; mais la détermination simultanée de toutes les circonstances dans lesquelles il se présente ne peut se faire mieux que par la méthode géométrique.

§ II. — J'entreprendrai maintenant l'étude du moteur excité en dérivation. Dans ce cas, on a les cinq relations :

$$\begin{aligned} v &= e_2 - e_1 + r_1 i_1 = r_2 i_2 \\ i &= i_1 + i_2 & e &= e_2 - e_1 & e_1 &= \rho i_1 \end{aligned}$$

qui ne sont plus homogènes, car nous supposons v constant ; une d'elles ne sera même plus linéaire, quand on supposera r_2 variable de façon à maintenir N constant. Le système est complété par la connaissance de la caractéristique principale $e_2 = f(i_2)$ et par la condition que le couple moteur soit égal au couple résistant :

$$C_M = \frac{e i_1}{2\pi N} = C_R.$$

Pendant le fonctionnement stable, la vitesse de rotation du moteur est déterminée par cette relation qui,

$$\text{à cause de } e = e_2 - i\rho_1 \text{ et de } i_1 = \frac{v - e_2}{r_1 - \rho}$$

peut s'écrire aussi sous la forme

$$(v - e_2)(r_1 e_2 - \rho v) = 2\pi N C_R,$$

e_2 devant correspondre à $i_2 = \frac{v}{r_2}$ à la vitesse N .

Si le couple résistant vient instantanément à changer, quelle que puisse être la vitesse de rotation de la machine sous la nouvelle charge, cette vitesse varie au premier abord selon une loi bien connue : elle diminue si le couple résistant augmente, elle augmente si le couple résistant diminue.

§ 12. — Soit VW (fig. 9) une droite représentant le potentiel que l'on maintient invariable aux bornes du moteur. Traçons trois droites ayant les paramètres de direction $r_2, -r_1, -(r_1 - \rho)$ par rapport à l'axe Oi en tenant compte,

comme il a été indiqué ailleurs, des échelles adoptées pour les voltages sur l'axe Oe et pour les courants sur l'axe Oi .

Soit $O\mathfrak{s}_0$ la caractéristique principale de la machine à une vitesse N_0 .

Si la droite r_2 coupe la droite VW en un point A d'abscisse $O\Omega$, on a

$$O\Omega = VA = \frac{\Omega A}{r_2} = \frac{v}{r_2} = i_2,$$

courant absorbé par les inducteurs.

Représentons maintenant le courant i_1 absorbé par l'armature dans un certain état de régime, par le segment $\Omega C = AB$; le segment $OC = VB$ représentera le courant $i_2 + i_1 = i$ fourni au moteur.

Si l'on trace à présent du point A une droite parallèle à $-r_1$, celle-ci coupe l'axe Oi à un point Y , tel que

$$\Omega Y = \frac{\Omega A}{r_1} = \frac{v}{r_1};$$

ΩY représente donc la valeur maxima du courant qui pourrait être absorbé par l'armature, c'est-à-dire le courant qui traverserait l'armature dans le cas abstrait qu'aucune force contre-électromotrice ne se produise en elle, la réaction d'induit restant toujours proportionnelle au courant.

Si cette droite AY coupe l'ordonnée CB à un point D , on a

$$CD = CB - r \times AB = v - r_1 i_1 = e = e_2 - e_1.$$

D est donc un point de la caractéristique $e = f(i_1)$ ou $e = f(i)$, selon que l'on prend Ω ou O comme origine du courant; et cette caractéristique tout entière n'est autre chose que la droite AY .

Si l'on trace ensuite du point A une droite parallèle à $-(r_1 - r)$, cette droite AX coupant l'ordonnée CB à un point E, on a

$$\begin{aligned} DE = DB - EB &= r_1 \times AB = (r_1 - r) \times AB = r \cdot AB \\ &= r i_1 = e_1 \end{aligned}$$

et

$$CE = CD + DE = e \times e_1 = e_2.$$

Le segment DE représente donc la réaction de l'armature dans le régime considéré et E est un point de la caractéristique $e_2 = f(i_1)$ ou $e_2 = f(i)$, selon que l'on prend Ω ou O comme origine du courant ; cette caractéristique tout entière n'est autre chose que la droite AX.

Si l'on trace de D et de E deux droites parallèles à Oi jusqu'à couper l'ordonnée ΩA dans les points F et G, on a donc

$$\Omega G = e_2, \quad FG = e_1, \quad \Omega F = e.$$

Puisque ΩG représente la force électromotrice engendrée par les inducteurs dans l'état de régime que l'on considère, la caractéristique principale $e_2 = f(i_2)$ relative à la vitesse N dans cet état, doit passer par le point G. On pourrait tracer cette caractéristique en amplifiant les ordonnées de la courbe $O\mathfrak{s}_0$ dans le rapport $\frac{\Omega G}{\Omega M}$, M étant le point où $O\mathfrak{s}_0$ coupe l'ordonnée ΩA . Mais comme un seul point de cette caractéristique est utilisé tant que r_2 , qui détermine ΩA , ne change pas, il n'est nullement besoin de faire ce tracé. Une autre circonstance, au contraire, doit être bien fixée. Comme à égalité d'abscisse, l'ordonnée de la caractéristique principale est exactement proportionnelle à la vitesse, on a

$$\Omega G : \Omega M = N : N_0.$$

Si donc, à une échelle convenable, ΩM représente la vitesse N_0 , à la même échelle ΩG représentera N , vitesse de rotation de l'armature dans l'état de régime envisagé, et comme $CE = \Omega G$, E sera aussi un point de la ligne $N = f(i_1)$ ou $N = f(i)$, selon que l'on prend Ω ou O comme origine du courant, et cette ligne tout entière ne sera autre chose que la droite AX . Une ordonnée de cette droite peut donc représenter, dans deux échelles particulières, soit la force électromotrice e_2 , soit la vitesse N , pour un courant donné.

L'ordonnée ΩA représente dans la seconde échelle la vitesse limite que pourrait acquérir le moteur à vide si les pertes par frottement, par courants de Foucault et par hystérésis étaient nulles ; l'armature n'absorberait alors aucun courant et la force électromotrice engendrée dans cet organe égalerait la différence de potentiel appliquée au moteur. Il n'est pas besoin de dire que ce cas est encore un cas abstrait. En réalité, l'armature absorbe à vide un courant, destiné à compenser ces pertes, généralement plus grand que le courant qui circule dans les inducteurs.

Nous avons donc déjà déterminé les valeurs de e_2 , e_1 , e et N correspondantes à un courant i absorbé par le moteur. Mais les constructions indiquées permettent de déterminer d'autres éléments du fonctionnement du moteur. On a, en effet :

Aire $OVBC = OV \times OC = Vi = W$: puissance électrique totale absorbée par le moteur ;

Aire $OVA\Omega = OV \times \overline{O\Omega} = vi_2 = r_2 i_2^2 = w_2$: puissance électrique dépensée en effet Joule dans les inducteurs ;

Aire $FABD = \overline{FA} \times \overline{\Omega C} = (v - e) i_1 = r_1 i_1^2 = w_1$: puissance électrique dépensée en effet Joule dans l'induit ;

Aire $\Omega FDC = \overline{\Omega F} \times \overline{\Omega C} = e i_1 = w$: puissance électrique qui alimente les pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis, et qui produit le travail mécanique vraiment utile.

On voit bien que $w = W - w_1 - w_2$. Le rendement électrique $\eta = \frac{w}{W}$ du moteur est donné par le rapport de l'aire ΩFDC à l'aire $OVBC$.

Le tableau des renseignements sera complet quand on aura à déterminer graphiquement le couple moteur dans l'état de régime considéré ; or, on a

$$C_M = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{e i_1}{N} ;$$

ce couple moteur peut donc être représenté, à une échelle convenable, par le quatrième terme de la proportion

$$N : e = i_1 : x,$$

qu'on peut mettre dans la forme

$$CE : CD = C\Omega : x.$$

Si l'on trace (fig. 10) du point D une droite parallèle à la droite $E\Omega$ et coupant l'axe Oi dans un point H, on a donc dans le segment CH une longueur proportionnelle au couple correspondant au courant OC ; et si du point H on trace dans une direction arbitraire (mais que l'on doit maintenir invariable dans la suite) une droite coupant au point R l'ordonnée CB, on a dans le segment CR une longueur qui peut représenter le couple moteur dans une échelle particulière. Cette échelle varie avec le paramètre de la direction arbitraire ; cette direction peut donc être choisie de façon que le couple soit représenté à une échelle voulue.

Dans la série de constructions de la première figure, on a supposé ρ constant et $\rho < r_1$, on a obtenu, partant, une droite AX descendant vers l'axe Oi; si l'on avait supposé $\rho > r_1$, on aurait eu à tracer une droite AX s'éloignant de l'axe Oi; dans le cas intermédiaire $\rho = r_1$, la droite AX se confond avec la droite AW. (Voir fig. 10.) On indiquera dans la suite les conséquences de ces différences.

§ 13. — Je passe maintenant, au moyen des constructions de la première figure (puisque le cas $\rho < r_1$ est pratiquement le plus fréquent) à l'étude du fonctionnement du moteur à un voltage constant en supposant que le courant qu'on lui fournit acquière successivement des valeurs toujours plus fortes (fig. 9).

Pratiquement, le moteur est entretenu en mouvement à vide par un courant Ωc , minimum il est vrai, mais qui n'est pas nul. La puissance électrique correspondant à ce courant doit compenser les pertes par frottements, par courant de Foucault et par hystérésis dans la marche à vide. Il en suit que la partie de toutes les courbes de fonctionnement en voisinage immédiat de l'ordonnée ΩA n'a pas de signification réelle. Ainsi la vitesse limite représentée par la longueur ΩA n'a aucune importance pratique; au contraire, la ligne de la vitesse devrait descendre rapidement de la valeur du mouvement à vide à une valeur nulle pour un courant moindre que le courant minimum que je viens d'indiquer; mais, comme on voit, elle ne correspondrait plus à un état de régime sous le potentiel constant donné. Le moteur étant en marche à vide, la force électromotrice utile Ωf a une valeur maxima. La perte dans les inducteurs est représentée par $OVA\Omega$; celle dans l'induit, représentée par $fAbd$ est maxima; la puissance totale absorbée par

le moteur, représentée par $OVbc$ est très petite ; et la puissance électrique dégagée, représentée par Ωfdc , est dépensée sans effet utile.

Le rendement électrique n'est donc pas nul, tandis que le rendement industriel est absolument nul.

Quand le moteur est chargé, il absorbe un courant plus fort que Ωc et il produit un travail utile.

Si le courant absorbé augmente, la puissance électrique fournie au moteur, $OVBC$ augmente dans la même proportion et, dans le cas que l'on considère, la vitesse diminue continuellement, la perte dans les inducteurs $OVA\Omega$ reste la même, la perte dans l'induit $FADB$ croît plus vite que le courant, la puissance électrique dégagée par le mouvement de l'induit ΩFDC croît d'abord pour décroître ensuite. Elle peut être représentée par les ordonnées d'une parabole

$$W = e i_1 = (v - r i_1) i_1 = v i_1 - r i_1^2$$

partant du point Ω correspondant à $i_1 = 0$ et passant par le point Y correspondant à $i_1 = \frac{V}{r_1}$, courant limite qu'on peut envoyer dans l'armature avec la différence de potentiel V . Cette parabole a le sommet (point d'ordonnée maxima) pour une abscisse

$$\Omega C = \frac{1}{2} \Omega Y \text{ à laquelle correspond } e = \frac{1}{2} V.$$

Pendant l'augmentation du courant absorbé, le rendement électrique η croît de la valeur qu'il a pendant la marche à vide jusqu'à une valeur maxima bientôt atteinte et qui dépend des valeurs de r_2 et de r_1 ; il diminue ensuite lentement jusqu'à une valeur quelque peu moindre de 0,50 correspondant au point où l'on a $e = \frac{1}{2} V$, et il décroît jusqu'à s'annuler par la suite.

La courbe de rendement pratique γ' est entièrement en dessous de la courbe du rendement électrique, à cause des pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis. Ces pertes ne varient pas beaucoup avec les conditions de fonctionnement du moteur, au moins pour tout le temps que ces conditions ne cessent pas de satisfaire aux exigences de la pratique.

En tout cas, le rendement pratique croît de la valeur nulle qu'il a pendant la marche à vide, à un maximum atteint quelque peu après le maximum du rendement électrique, et toujours inférieur à celui-ci, pour diminuer ensuite.

[La figure 9 dont tous les éléments graphiques se correspondent entre eux, mais ne correspondent pas séparément à la réalité, indique un accroissement des deux rendements moins rapide et moins haut que le vrai, parce qu'on a dû exagérer le courant i_2 absorbé par l'enroulement inducteur et la résistance r_1 de l'armature, ce que la figure même exige pour être claire.]

Il est bon de remarquer que tandis que l'étendue de la portion Ωc des diagrammes qui ne peut correspondre à aucun fonctionnement réel dépend uniquement de l'importance des pertes par frottements, par courants de Foucault et par hystérésis à vide, l'étendue de l'autre portion γY des diagrammes qui ne peut également correspondre à aucun fonctionnement réel dépend non seulement de l'importance de ces pertes en charge (qui, contrairement à la supposition faite, sont plus grandes que les mêmes pertes à vide), mais encore de ce chef que la réaction de l'induit n'est plus proportionnelle au courant qui le parcourt, outre certaines limites.

Sans cette circonstance et si les pertes sus-indiquées restaient constantes, l'ordonnée limitant la portion utile des diagrammes partirait du point γ' , tel que $\gamma Y = \Omega c$.

D'ailleurs, il ne conviendrait jamais de faire travailler le moteur avec de très forts courants, soit à cause du faible rendement électrique et pratique qu'il présenterait, soit à cause des dangers que courrait l'armature, soit, chose plus importante, à cause de l'instabilité du fonctionnement qui se manifeste, comme on va voir bientôt, dans le cas pris en considération ($\rho < r_1$).

§ 14. — Pour procéder comme j'ai fait pour la dynamo, je remarquerai, à présent, que quatre choses principales sont à rechercher dans le fonctionnement d'un moteur en dérivation.

1° La constance de la vitesse de rotation de l'organe mobile, soit de l'induit, c'est à dire faible inclinaison de la ligne AX entre les ordonnées bornant la série des états de régime, que l'on a lieu de considérer en pratique ;

2° La stabilité du fonctionnement sous des charges assez différentes et un couple moteur maximum suffisant ;

3° Un bon rendement dans les conditions de fonctionnement acceptable au point de vue de la stabilité ;

4° Un démarrage facile.

Les éléments que l'on peut faire varier, dans la construction ou bien pendant le fonctionnement du moteur, sont :

1° La reluctance du circuit magnétique, c'est à dire la forme de la caractéristique principale ;

2° Le potentiel normal de fonctionnement, c'est à dire la distance de la droite W de l'axe Oi ;

3° La réaction et la résistance de l'induit, c'est à dire l'inclinaison de certaines droites de construction r_1 et $r_1 - \rho$;

4° La résistance de l'enroulement inducteur, c'est à dire l'inclinaison de la droite de construction r_2 .

§ 15. — Supposons maintenant que l'on puisse faire varier, sans inconvénient, l'angle de calage α de balais, de manière à avoir successivement

$$\rho < r_1, \quad \rho = r_1, \quad \rho > r_1,$$

r_1 restant constant. (Fig. 10)

Nous avons déjà considéré le premier cas, $\rho < r_1$, et nous avons vu que, pendant que le courant absorbé par le moteur augmente, la force électromotrice utile e et le travail électrique restitué ei varient respectivement comme les ordonnées d'une droite et d'une parabole indépendantes de ρ . Nous avons vu encore que la force électromotrice e_2 due aux inducteurs seuls et la vitesse N diminuent alors continuellement, quoique moins vite que la force électromotrice utile e .

On peut voir maintenant que le couple moteur $\frac{ei}{2\pi N}$ se ressent des variations du travail électrique restitué et des variations de la vitesse. Il croît d'abord pour diminuer ensuite, et présente un maximum au-delà du maximum de travail électrique.

Dans le premier cas, $\rho < r_1$, le fonctionnement du moteur n'est stable que pour des états intermédiaires entre la marche à vide et la marche correspondant au couple maximum. Dans ces conditions, si le couple résistant vient à augmenter (ou à diminuer) immédiatement et pour une cause purement dynamique, le moteur ralentit (ou accélère). Une telle variation de vitesse change son état de régime électrique; le moteur demande alors un courant plus (ou moins) intense et le couple moteur croît (ou diminue). Comme la variation du couple moteur se fait dans le même sens que celle du couple résistant, l'équilibre entre les deux doit s'établir de nouveau, ce

qu'on indique en disant que le fonctionnement du moteur est stable.

On voit facilement que l'équilibre se rétablit d'autant plus vite que la ligne de la vitesse est moins inclinée, car alors, une plus petite variation de la vitesse de l'induit entraîne une plus grande variation du couple moteur.

Pour des états représentés par des ordonnées placées au-delà de celle qui correspond au maximum de la courbe des couples moteurs, une augmentation (ou une diminution) du couple résistant conduisant, comme toujours, à un ralentissement (ou à une accélération) du moteur, porterait encore à une augmentation (ou à une diminution) du courant absorbé par le moteur même ; mais à celle-ci correspondrait une diminution (ou une augmentation) du couple moteur. Comme la variation des deux couples se fait alors en sens contraire, l'équilibre ne peut plus se rétablir ; le fonctionnement du moteur est instable ; la moindre variation d'état s'exagère. Dans le cas d'une augmentation du couple résistant, le moteur finit par s'arrêter ; dans le cas d'une diminution du couple résistant, le moteur accélère jusqu'à ce que son état ait remonté la branche descendante, passé par le maximum et se soit porté sur la branche ascendante de la courbe du couple moteur, où le fonctionnement redevient stable. Évidemment, dans les intervalles de temps où le moteur, contraint à passer brusquement d'un état de régime à un autre, fonctionne dans des conditions qui ne se retrouvent pas sur les diagrammes relatifs au potentiel normal, le moteur réagit sur la source et la différence de potentiel aux bornes peut osciller entre des valeurs plus ou moins voisines.

Dans le second cas, $\varphi = r_1$, les variations de la force électromotrice utile e et du travail électrique ei_1 , accompli

par le moteur, sont les mêmes, par rapport aux valeurs du courant absorbé par le moteur que dans le premier cas, parce que ces deux éléments ne dépendent que de r_1 que l'on a supposé constant.

Mais alors

$$e_2 = e + e_1 = v - r_1 i_1 + \rho i_1 = v$$

et la vitesse N est constante. Dans ce cas, le couple moteur $\frac{ei_1}{2\pi N}$ suivrait fidèlement les variations du travail électrique absorbé par le moteur. Si le couple résistant variait, la vitesse, à la rigueur, devrait varier, mais ses variations seront imperceptibles, car la sensibilité du moteur est extrême (limite du cas précédent), c'est un moteur autorégulateur pour vitesse constante.

Dans le troisième cas, $\rho > r_1$, la force électromotrice e et le travail électrique ei_1 suivent encore les mêmes lois que dans les cas précédents. Mais, pendant que le courant absorbé augmente, la force électromotrice e_2 et la vitesse N croissent continuellement, contrairement à ce qui arrive dans le premier cas.

Le couple moteur $\frac{ei_1}{2\pi N}$ croît encore au commencement pour décroître ensuite ; mais cette fois, son maximum se présente avant le maximum du travail électrique ei_1 .

Dans ce cas, le fonctionnement du moteur n'est stable que pour des états ultérieurs à la marche par un couple maximum. Dans ces conditions, les variations du couple résistant produisent des variations de vitesse, auxquelles correspondent des variations du couple moteur de même sens.

Pour des états antérieurs, au contraire, le fonctionnement est instable ; dans le cas d'une augmentation du

couple résistant, le moteur ralentit et se désamorce ; dans le cas d'une diminution, le moteur accélère et le fonctionnement passe à un état représenté sur l'autre branche de la courbe du couple moteur. Ces mêmes circonstances se présentent si on alimente le moteur à vide : le couple résistant diminue du démarrage à la marche ; le moteur s'emporte, surpasse le sommet de la courbe indiquée et se met à fonctionner avec un courant exagéré et un rendement minime.

De ce qui précède, il résulte qu'on ne peut avoir un bon fonctionnement, soit sous le point de vue de la stabilité, soit sous celui du courant absorbé, soit sous celui du rendement, que si l'indice de réaction de l'armature φ est moindre de la résistance ohmique r de cet organe. Cette différence peut être minime et réalise même alors une très grande facilité de réglage et une sensible constance de vitesse dans le moteur.

Il est facile de voir que l'augmentation de φ correspond, quant à ces effets, à l'adaptation d'un enroulement compound différentiel sur le moteur, car le compound, comme les spires antagonistes de l'armature, produit une diminution du flux magnétique utile d'autant plus grande que le courant absorbé par l'armature est plus grand.

Cette remarque démontre que l'on peut étudier les moteurs compound par la même méthode que le moteur en dérivation, tant que l'enroulement en série n'a pas un rôle prépondérant, car, dans ce dernier cas, son action ne peut plus être supposée simplement proportionnelle au courant.

Dans ce qui suit, nous supposerons, désormais, $\varphi < r$.

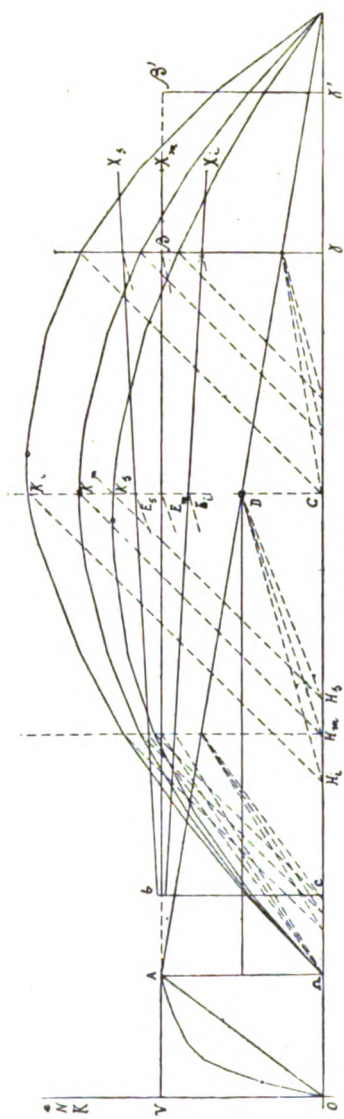


Fig. 10.

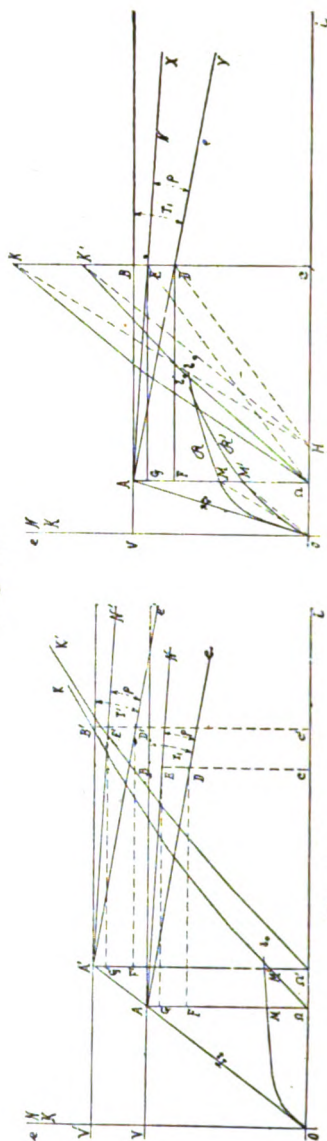


Fig. 11.

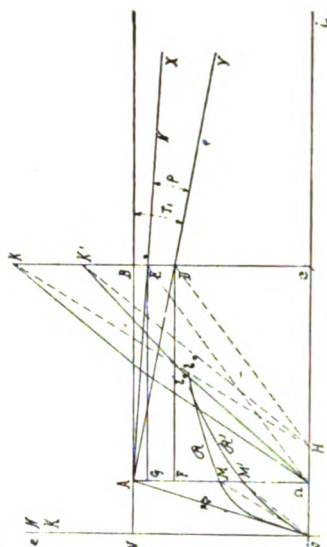


Fig. 12a.

§ 16. — La figure 11 indique l'influence de la valeur du voltage appliqué aux bornes du moteur en dérivation, lorsque les résistances dans l'induit et dans les inducteurs restent constantes.

Le courant absorbé par les inducteurs varie en proportion du voltage, mais ce courant est pratiquement une fraction bien petite du courant total absorbé par le moteur.

A égalité de courant absorbé par l'armature, la chute de potentiel $r_1 i_1$ étant la même, la force électromotrice e croît avec le voltage appliqué ; la force électromotrice $e_2 = e + \rho i_1$ aussi.

Le point de la caractéristique principale utilisé dans les différents fonctionnements est différent et remonte cette courbe au fur et à mesure que le voltage s'élève. Mais la coordonnée ΩM de ce point sur la caractéristique $O\phi_0$ correspondante à la vitesse de comparaison N_0 , croît moins vite que la coordonnée ΩG représentant la force électromotrice due aux seuls inducteurs. Partant, la vitesse du moteur, donnée par le rapport $\frac{\Omega G}{\Omega M}$ croît avec le voltage appliqué. (Si l'on tenait compte de la diminution simultanée de l'indice de réaction de l'armature ρ , quoique excessivement petite, on trouverait un accroissement encore un peu plus fort.)

Quant à la puissance électrique développée par le moteur, elle est évidemment plus grande quand le voltage est plus élevé. Cette puissance croît même plus rapidement que la vitesse, et le couple moteur $\frac{ei_1}{2\pi N}$, à parité de courant dans l'armature, est toujours plus grand quand le voltage est plus élevé. Il n'en est pas de même à parité de courant total absorbé par le moteur, mais seulement dans le fonctionnement sous une très

petite charge. Ensuite la vitesse et le couple moteur varient tous les deux dans le même sens que le voltage appliqué, pour un même courant absorbé par le moteur.

§ 17. — La fig. 12 *a* indique les effets de la variation de la reluctance du circuit magnétique du moteur.

$O\mathfrak{s}_0$ est la caractéristique à circuit ouvert à la vitesse N_0 , en supposant la carcasse de la machine douée d'une plus petite reluctance $\mathfrak{R}$, et $O\mathfrak{s}_0'$ est la même caractéristique à la même vitesse, en supposant la carcasse douée d'une plus grande reluctance $\mathfrak{R}'$.

Pour des mêmes valeurs de r_2 , de r_1 et de φ , sous le même voltage appliqué et par un même courant absorbé, les f. e. m. utile e et celle due aux inducteurs seuls e_2 restent les mêmes, aussi bien que la puissance électrique utile ei_1 .

Mais comme l'ordonnée du point utilisé sur la caractéristique principale à la vitesse de comparaison N_0 est différente dans les deux cas, la vitesse

$$N = \frac{\Omega G}{\Omega M} \text{ et le couple moteur } C_M = \frac{ei_1}{2\pi N}$$

sont différents dans les deux cas. Selon que la reluctance du circuit est plus petite ou plus grande, cette ordonnée est plus grande (ΩM) ou plus petite ($\Omega M'$), la vitesse est plus petite ou plus grande et le couple moteur est plus grand (K) ou plus petit (K').

Il y aurait donc moyen de régler la vitesse et le couple d'un moteur en faisant varier la reluctance de son circuit magnétique. Supposons, par exemple, que la culasse ne soit pas continue dans toute sa section, mais qu'elle comporte un coin, à dièdre très aigu, qu'on pourrait déplacer en rompant ainsi la continuité d'une partie du

circuit magnétique par un ou deux entrefers, dont on pourrait faire varier l'importance. Alors, quand on voudrait adapter la machine à produire un certain travail, par un couple moteur plus petit, mais avec une vitesse plus grande, sans changer, par exemple, son couplage avec une machine-outil quelconque, on n'aurait qu'à déplacer le coin (de matière magnétique comme la culasse), de façon à ménager un entrefer en plus sur le parcours d'une partie variable des lignes d'induction à l'intérieur de la carcasse du moteur.

Pour tracer les diagrammes des couples moteurs à la même échelle dans le cas que l'on voudrait comparer le fonctionnement du moteur à des reluctances différentes, il n'y a qu'à prendre comme direction arbitraire pour passer du point N au point K (voir § 12), la direction OM allant de l'origine des axes au point utilisé de la caractéristique principale O*g*, par un courant inducteur O*Ω* et par une vitesse de comparaison N₃. En effet, on a

$$C_M = \frac{ci_1}{2\pi N} = \frac{ci_1}{2\pi} \frac{\Omega M}{\Omega G},$$

où ΩM seul varie avec la reluctance, c'est-à-dire K est proportionnel à ΩM , ce qui est reproduit par la construction qu'on vient d'indiquer.

§ 18. — La figure 13 indique les effets de la valeur de la résistance ohmique sur le circuit qui comprend l'enroulement induit. Cette résistance, pouvant se composer de la résistance de cet enroulement et d'une résistance en série avec celle-ci, peut-être pratiquement variée à volonté. C'est ce que l'on fait ordinairement au moyen du rhéostat de démarrage.

r_2 et ε restant les mêmes, à égalité de courant absorbé

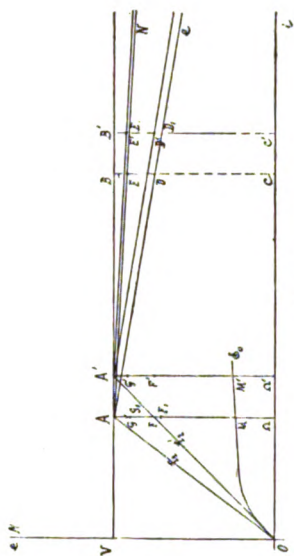


Fig. 14.



Fig. 12b.

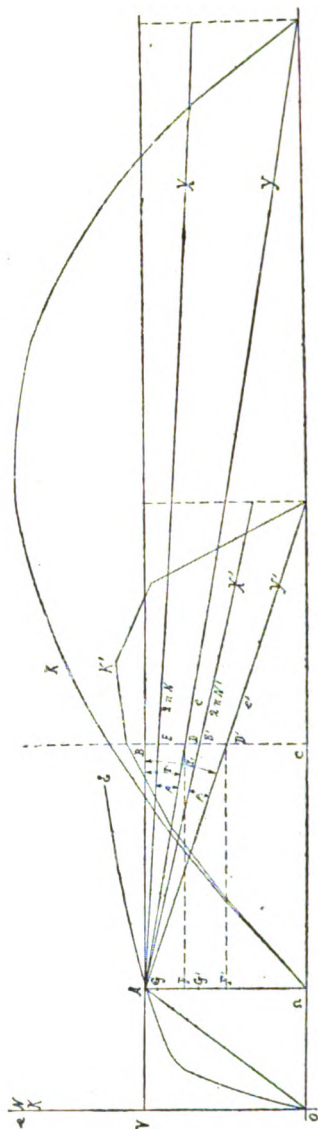


Fig. 13.

par le moteur, la f. e. m. $e = v - r_1 i_1$ diminue quand r_1 croît. La puissance électrique ei_1 , la f. e. m. $e_2 = e + \xi i_1$ et la vitesse N sont donc plus grandes quand r_1 est plus petit et plus petites quand r_1 est plus grand. Quant au couple moteur, il est effectivement toujours moindre quand r_1 est plus grand, mais comme la puissance ei_1 et la vitesse N varient tous les deux en sens contraire à r_1 , ce couple K ne se ressent pas beaucoup des variations de r_1 , au moins sous les petites charges.

Cette circonstance explique la convenance de l'emploi d'un rhéostat en série avec l'armature pour le démarrage. Ce rhéostat restreint dans les limites convenables le courant circulant dans l'armature, sans trop réduire le couple moteur qui correspond au courant que le moteur peut alors absorber.

§ 19. — La fig. 14 montre l'influence de la valeur de la résistance ohmique de la dérivation qui comprend l'enroulement inducteur. Cette résistance, pouvant se composer aussi de la résistance de cet enroulement et d'une résistance en série avec celle-ci, peut être aussi pratiquement variée à volonté. C'est ce que l'on fait ordinairement au moyen du rhéostat de champ.

Le courant absorbé par les inducteurs varie en proportion inverse de la résistance r_2 , mais encore ce courant est, pratiquement, une fraction assez petite du courant absorbé par tout le moteur.

r_1 et ρ restant les mêmes, à égalité de courant absorbé par l'armature, la f. e. m. $e = v - r_1 i_1$ ne change pas, la puissance électrique ei_1 non plus.

Le point de la caractéristique principale $O\delta_0$, relative à la vitesse de comparaison N_0 , utilisé dans des fonctionnements par des valeurs différentes de r_2 , varie et remonte la courbe à mesure que la résistance r_2 dimi-

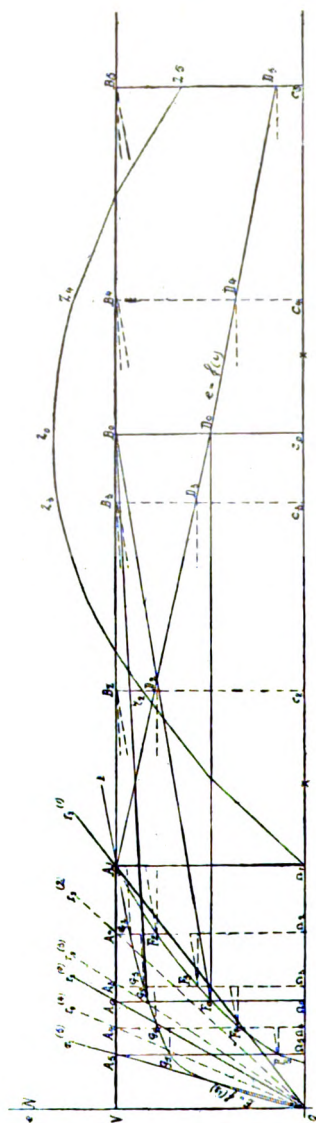


Fig. 15.

nue, c'est-à-dire à $r_2' < r_2$ correspond $\Omega'M' > \Omega M$. Partant $N' < N$, c'est-à-dire la vitesse de rotation, subit des variations analogues à celles que subit la résistance r_2 , ou la partie de celle-ci qui est fournie par le rhéostat de champ.

Quant au couple moteur, comme la puissance reste la même, il subit des variations inverses à celle de la vitesse, c'est à dire des variations de signe contraire à celle de la résistance r_2 .

A égalité de courant total absorbé par le moteur, les f. e. m. e et e_2 sont quelque peu plus grandes quand la résistance r_2 est plus petite. Cela veut dire que les flux $\mathfrak{K}$ (total) et $\mathfrak{K}_2$ (dû aux seuls inducteurs) diminuent quand r_2 augmente. Pour un même courant total, l'armature absorbe un courant plus grand quand r_2 augmente ; dans ce cas, le flux $\mathfrak{K}_1$ (antagoniste) croît, contrairement aux deux flux précédents. On retrouve toujours que la vitesse augmente quand le flux $\mathfrak{K}$ diminue.

Il résulte donc que l'on peut maintenir absolument constant la vitesse du moteur, au moins entre certaines limites de charge, en agissant sur l'excitation au moyen du rhéostat de champ.

§ 20. — La fig. 15 indique comment doit varier la résistance r_2 , sous les différentes charges, pour que le moteur conserve une vitesse constante N . Elle se prête donc au calcul de la résistance à mettre dans le rhéostat de champ.

Soit OG_0 la caractéristique principale de la machine à la vitesse N et soit V la d. d. p. à maintenir à ses bornes. Considérons le fonctionnement de la machine absorbant un courant total OC_0 . Élevons l'ordonnée C_0B_0 de manière que $VB_0 = i$. Traçons B_0G_0 ayant pour paramètre de direction $r_1 - \rho$. On détermine ainsi le point G_0 de la caractéristique qui est utilisé dans les conditions

spéciales de fonctionnement que l'on veut envisager. Par G_0 on trace $\Omega_0 A_0$ parallèle à OV et par B_0 on trace $B_0 F_0$ ayant pour paramètre de direction r_1 . Finalement on trace la droite OA_0 ; celle-ci aura pour paramètre de direction r_2 , valeur de la résistance totale que doit présenter, en ce cas, la dérivation des inducteurs, pour que la vitesse soit N . En effet, dans ce cas, VA_0 peut représenter $i_2 = \frac{V}{r_2}$; $A_0 B_0$ peut représenter $i_1 = i - i_2$; $\Omega_0 G_0$ peut représenter $e_2 = V - (r_1 + \rho)i_1$; $\Omega_0 F_0$ peut représenter $e = V - ri_1$ et e_2 est telle que la caractéristique principale suivant laquelle fonctionne la machine est précisément la courbe $OG_0 A_1$, qui correspond à la vitesse N .

Traçons $F_0 D_0$ parallèle à $\Omega_0 C_0$, mesurons l'aire $\Omega_0 F_0 D_0 C_0$, portons un segment proportionnel à cette aire de C_0 vers Z_0 parallèlement à OV ; le point Z_0 appartient à un diagramme de la puissance électrique utile $w = ei_1 = \Omega_0 F_0 \times \Omega_0 C_0$ et à un diagramme du couple moteur $K = \frac{w}{2\pi N}$ tracés à des échelles différentes.

En changeant la valeur OC du courant absorbé de OC_1 à OC_3 et en répétant les opérations graphiques sus-indiquées, on obtient un faisceau de droites OA_1 à OA_3 , représentant, par leur paramètre de direction, les différentes valeurs de la résistance r_2 qui y correspondent.

La résistance des inducteurs, proprement dite, ne devra pas être plus petite que le coefficient angulaire de la droite OA_1 , A_1 étant le point de la caractéristique Os ayant pour ordonnée la valeur du potentiel appliqué aux bornes. Elle pourra être un peu plus forte, en raison du courant absorbé par le moteur à vide, qui est certainement supérieur à Ω , valeur pour laquelle le travail électrique serait nul.

La résistance de toute la dérivation contenant l'enroulement inducteur pourra ne pas être plus grande que le

coefficient angulaire de la droite OA_0 correspondant à la valeur OC_0 du courant, pour laquelle le travail électrique utile et le couple moteur sont maximums. Une résistance plus grande correspondrait à un fonctionnement avec un rendement moindre de 0,50.

La résistance à placer dans le rhéostat de champ sera donc donnée par l'excès du paramètre de direction de la droite OA_0 sur le paramètre de direction de la droite OA_1 .

On voit donc bien que la connaissance de la caractéristique à circuit ouvert, qui permet d'abord l'évaluation du paramètre ρ (inclinaison moyenne de $O\delta$ entre G_0 et A_1 , divisée par $\frac{2\pi n_2}{\alpha n_1}$) et la connaissance de r_1 , permettent de déterminer, sans indécisions, la résistance r_2 et sa répartition entre les enroulements inducteurs et le rhéostat de champ, par des constructions graphiques d'une simplicité extrême.

On se rend compte, une fois de plus, de la puissance de cette méthode.

(Applaudissements.)

M. Del Proposto, *président*, remercie M. Della Riccia de sa communication que l'assemblée a écoutée avec un intérêt manifeste.

L'heure étant déjà avancée, il propose la remise à une prochaine séance de la communication de M. L'Hoest sur le calcul des éclairagements. — Adopté.

La séance est levée à midi et quart.

SÉANCE DU 26 JUIN 1898



Ont signé la liste de présence : MM. Cheftel, Crudenaire, De Bast, Della Riccia, Del Proposto, de Ryckere, Firket, Fontaine F., Gielen, Henrion A., Herzen, Ivanoff, Manzoni, Maternowski, Melotte, Micheels, Moens, Neujean, Paquot, Raudot, Roussakoff, Schiesari, Sperk, Van der Wallen.

M. Del Proposto, président, au fauteuil.

M. L'Hoeft, en mission, étant empêché d'assister à la séance, lecture de sa communication est donnée par M. De Bast :

Procédé graphique pour la détermination des éclairéments.

Lorsque dans l'étude d'un projet d'éclairage, on se propose de déterminer *à priori* la distribution de la lumière sur la zone à éclairer, on se heurte à des difficultés insurmontables si l'on doit tenir compte de surfaces réfléchissantes. Dans le cas de l'éclairage des espaces découverts, des rues, des parcs, des gares, où le phénomène de réflexion est négligeable, le problème peut se résoudre analytiquement, mais au prix de calculs fastidieux qu'il faut répéter à chaque retouche du projet.

A l'occasion d'une étude de l'espèce, j'ai fait usage d'un procédé graphique, beaucoup plus expéditif, que je me propose de vous exposer.

Ce procédé suppose la connaissance de la courbe des intensités, suivant les divers azimuths, des foyers à employer et la courbe théorique des intensités que devrait

avoir un foyer pour éclairer uniformément une surface plane quelconque.

La première de ces courbes est déterminée expérimentalement par des moyens connus.

La seconde se trace aisément, ainsi que je vais le montrer. Supposons une source lumineuse ponctiforme O

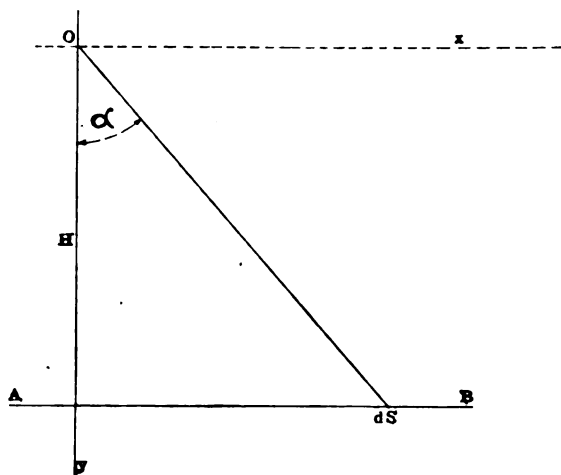


Fig. 1.

émettant des rayons lumineux d'intensité variable I pyrs, suivant les divers azimuths, vers un plan AB situé à une distance H en dessous de la source.

Le flux lumineux élémentaire suivant le rayon OS sera

$$d\Phi = I d\sigma$$

et l'éclairement de la surface élémentaire dS

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = I \frac{d\sigma}{dS} = \frac{I}{R^2} \cos \alpha,$$

ou bien encore, à cause de $H = R \cos \alpha$

$$E = \frac{I}{H^2} \cos^3 \alpha. \quad (1)$$

Dans cette expression E , I et α sont les variables. Si nous assignons à E une valeur constante,

$$I = \frac{E H^2}{\cos^3 \alpha} \quad (2)$$

sera l'équation en coordonnées polaires de la courbe des intensités donnant l'uniformité d'éclairement.

Remarquons que si nous déplaçons le plan parallèlement à lui-même, la courbe ne changera pas à la condition d'assigner à E une valeur réduite ou augmentée dans le rapport inverse de H^2 . En d'autres termes, le foyer dont la courbe d'intensité serait donnée par l'équation (2) éclairera uniformément tout plan parallèle à AB , mais l'éclairement sera en raison inverse de H^2 .

Cette équation, transformée en coordonnées rectangulaires ox et oy devient :

$$y^3 - y^2 I_0 - x^2 I_0 = 0 \quad (3)$$

I_0 représentant la longueur proportionnelle à l'intensité du rayon vertical dirigé vers le bas. Cette longueur peut être prise arbitrairement pour le but que nous poursuivons : nous la supposerons égale à l'unité. L'équation (3) devient donc :

$$y^3 - y^2 - x^2 = 0 \quad (4)$$

d'où

$$x = \pm y \sqrt{y-1} \quad (5)$$

Cette expression (5) nous permet de tracer très rapidement la courbe ; en assignant à y des valeurs successive-

ment croissantes, à partir de l'unité, nous tirerons d'un seul coup de règle à calcul les valeurs correspondantes de x .

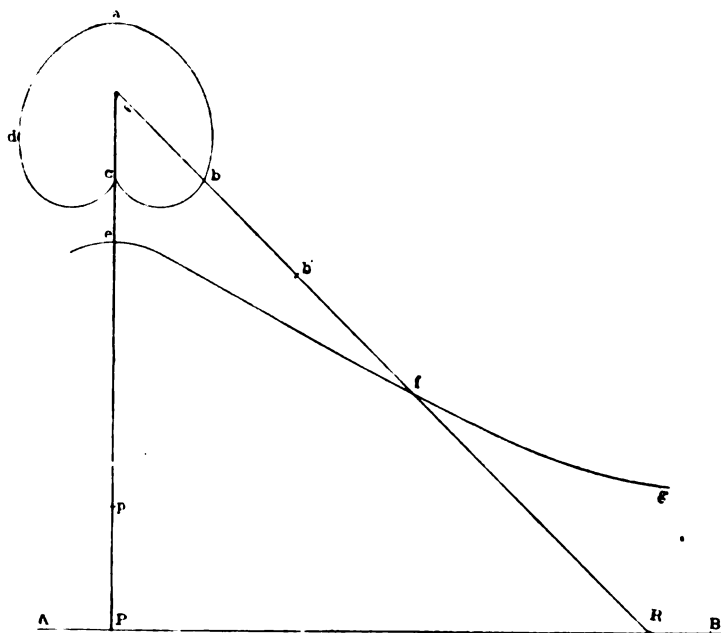


Fig. 2.

On remarquera que la courbe, d'ailleurs symétrique par rapport à l'axe Oy , présente, de part et d'autre de cette ligne, un point d'inflexion déterminé par la condition

$$\frac{d^2x}{dy^2} = \frac{1}{2} \frac{3\sqrt{y-1} - \frac{1}{2}(3y-2)\frac{1}{\sqrt{y-1}}}{y-1} = 0$$

ou $y = \frac{4}{3}$, valeur à laquelle correspond

$$x = \frac{4}{3\sqrt{3}}$$

La tangente au point d'inflexion a pour équation :

$$x = 1,73 y - 1,535 \quad (6)$$

Ainsi qu'on peut le constater par l'examen de la figure, cette droite peut être substituée à la courbe pour des calculs approchés, à condition que l'angle α ne dépasse pas sensiblement 45° .

Ceci posé, considérons une surface plane AB éclairée par une source O , dont nous connaissons la courbe des intensités $a b c d$, et proposons-nous de déterminer la valeur de l'éclairement en des points tels que R .

Appliquons en O l'origine des axes de la courbe d'égal éclairement $c f g$ et superposons l'axe des y avec la ligne verticale $O p$ passant par le foyer O .

Nous déterminerons aisément l'éclairement en P

$$E_p \text{ (lux)} = \frac{O c \text{ (pyrs)}}{H^2 \text{ (mètres)}}$$

Portons une hauteur $P p$ proportionnelle à E_p

Pour que l'éclairement en R fût égal à celui en P , il faudrait que le vecteur $O b$ devint $O b'$, de telle sorte que $\frac{O b'}{O f} = \frac{O c}{O c}$.

En fait, l'éclairement en R est à celui en P comme $O b$ est à $O b'$

$$\begin{aligned} \frac{E_R}{E_P} &= \frac{O b}{O b'} = \frac{O b}{O f} \times \frac{O c}{O c} \\ E_R &= \frac{O b}{O f} K \end{aligned} \quad (7)$$

en posant $K = E_P \frac{O c}{O c}$; cette quantité K est constante pour tous les calculs d'éclairement du plan.

Un seul coup de règle donne donc la valeur de l'éclairément en un point quelconque du plan.

On peut avoir à déterminer l'éclairément dans un autre plan que celui du sol, sur la façade d'un monument par exemple. Le procédé est le même : laissant en place la courbe du foyer, on amène la courbe d'éclairément uniforme, tracée sur toile à calquer, de telle façon que l'axe des y soit normal à la surface et on opère comme précédemment.

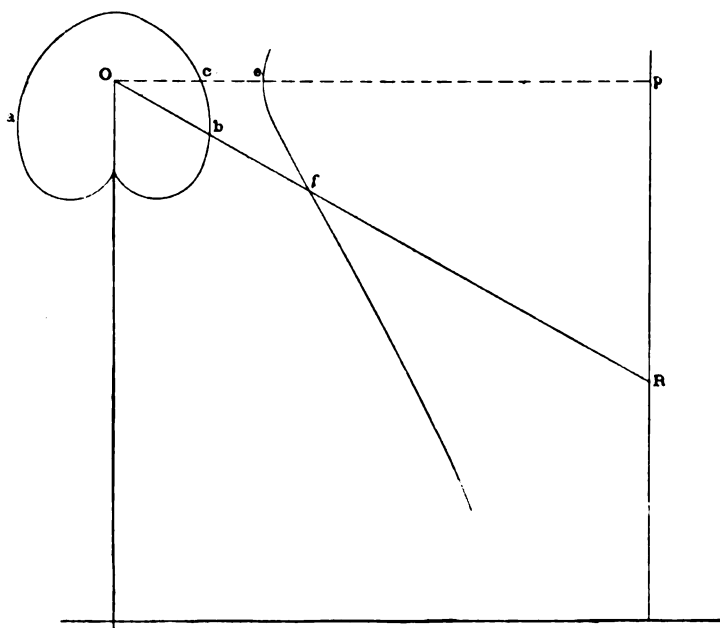


Fig. 3.

De cette manière, on obtiendra la répartition de la lumière suivant la verticale passant par le pied de la normale OP .

Suivant toute autre verticale, on utilisera le même dia-

gramme, sauf à réduire la valeur des éclairéments dans le rapport $\frac{OP^1}{OP^1 \cos \gamma}$, γ étant l'angle que OP^1 fait avec la normale. Ce rapport est aussi constant pour tous les points d'une même verticale.

Comme M. le professeur Gerard l'a fait remarquer, les différents éclairéments dus à différents foyers peuvent être cumulés de façon à donner, par un système de projections cotées, l'éclairément d'un ensemble de foyers.

La courbe d'égal éclairément rapprochée de la courbe d'intensité d'un foyer, suivant les azimuths, permet aussi d'apprécier les qualités de ce foyer et de ses diffusants au point de vue de l'uniformité d'éclairage. Ce rapprochement permet de constater notamment que les globes opalins sphériques sont inférieurs sous ce rapport au verre clair et aux globes cylindriques à fond bombé.

Enfin, cette courbe est indispensable pour l'étude des artifices employés pour répartir également la lumière, tels que les réflecteurs et les globes holophanes.

(Applaudissements.)

Il est procédé à l'élection du Président pour l'exercice 1897-1898.

Prennent part au vote, MM. Aguado, André, Antoniotti, Bede, Bertholet, Betocchi, Briffaux, Chantraine, Clerici, Colard, Coops-Busgers, Coüard, Decroës, De Bast, Del Proposto, Derclaye, de Ryckère, de Sauteiron, Dethioux, de Waal, de Woyciechowski, d'Hoop, Duchesne, Duez, Firket, Francken, Fontaine F., Gerard Em., Giustetti, Henrard, Henrion A., Jullien, Lambert, Latmiral, L'Hœst, Libert, Loewenstein, Martin J., Mathieu, Maus, Mélotte, Nobili, Noirfalise, Orban, Peltzer, Pescetto, Picard, Pierard, Pierron, Poenaru, Quinaux, Revel, Séc, Segre E., Semenza, Theunis, Turchi, Van der Hecht, Van der Wallen, Van Dooren, Van Vloten, Verdeleanu, Ver Eecke, Viscidi, Wery, Wigny.

M. De Bast est élu président pour l'année 1897-1898.

(Applaudissements.)

La séance est levée à midi et quart.

CHRONIQUE.



Informations. — Nous apprenons le mariage de notre camarade M. Andringa, Alexandre, avec M^{lle} Émilie Lagrange, et celui de notre camarade M. Marchal, Léon, avec M^{lle} Louise Curnel.



Examens de sortie de l'Institut Montefiore.

Ont obtenu le diplôme d'ingénieur-électricien :

1^o Dans la section des élèves-ingénieurs :

Avec distinction :

M. Delori, Jean, de Snaeskerke ;

D'une manière satisfaisante :

MM. Pavlitzky, Joseph, de Koutaïs ; Bronne, Richard, de Liège ; Hefter, Simon, d'Odessa ; Martin-Cartova, Modeste, de Santander ; Delgoffe, Léon, de Huy ; Loser, Hubert, d'Echternach ; Jaspar, Albert, de Liège ; Rouard, Henri, de Rotterdam ; Würth, Georges, d'Arlon ; Cumont, Fernand, d'Alost.

2^o Dans la section des ingénieurs :

Avec la plus grande distinction :

M. Della Riccia, Angelo, de Florence.

Avec grande distinction :

MM. Somerhausen, Georges, de Bruxelles ; Leguillon, Henri, de Caen ; Moens, Albert, de Saint-Josse-ten-Noode.

Avec distinction :

MM. Herzen, Hugo, de Florence ; Riboni, Carlo, de Cassalpusterlings ; Baudalet, Emile, de Châtelet ; Marchal, Léon, de Bourg-Léopold ; Roussakoff, Serge, de Twer ; Hainaut, Stephan, de Quaregnon ; Friederichs, Jean, d'Amsterdam ; Nering-Bögel, Jean, de Deventer ; Manzoni, Dominique, de Liège.

D'une manière satisfaisante :

MM. Berger, Richar'd, de Marcinelle ; Henrion, Marcel, de Jupille ; Jadot, Lambert, d'On ; Marchand, Albert, de Louvain ; Polivanoff, Michel, de Moscou ; Dechaine, Jean, de Verviers ; Cheftel, Joseph, de Bobrouisk ; Micheels, Maurice, de Liège ; Weinstock, Wladimir, d'Odessa ; Wilkin, Gustave, de Moscou ; de Grimouard, Jacques, de Breil ; Ivanoff, Nicolas, de Penza ; Bardiaux, Georges, de Dinant ; Zocchi, Alexandre, de Florence ; Pellegrin, Lucien, de Piétrain ; Van den Savel, Paul, de Montegnée ; Jeanjean, Marc, de Chartres ; Ottavi, Ludovic, de Trevize ; Lopatine, Ismaël, de Moscou ; Hachez, Gaston, de Soignies ; Bedoret, Henri, de Clermont-Walcourt ; Spruyt, Carlo, d'Anvers ; Pierre, Amédée, d'Ostende ; Andouche, Camille, de Walcourt ; Sacerdotti, Jules, de Bozolo ; Prion, Florent, de Neufchâteau ; Meeus, Raoul, d'Anvers ; Dupont, Jules, de Liège.

Ont obtenu le certificat de fréquentation avec fruit :

Avec distinction :

MM. Foucault, Charles, de La Roche-Guyon ; Crude-
naire, Fernand, de Rome.

D'une manière satisfaisante :

MM. Aragon, Casimir, de Seix ; Hoogwinkel, Gérard,
d'Amsterdam ; Cousin, Elie, de Toulouse ; Bodde,
Théodore, de Batavia ; Tidemand, Adolphe, de Bergen ;
Neu Jean, Paul, de Liège ; Boulanger, Albert, de Douai ;
Passet, Claude, de Toulon ; Reboux, Charles, de Be-
renbrecht.

* * *

NÉCROLOGIE.



JOHN HOPKINSON.

Le monde scientifique et plus spécialement le monde électrique vient de faire une perte considérable par la mort du Dr John Hopkinson, membre honoraire de notre Association.

A ce titre, c'est lui rendre un dernier hommage que de retracer ici la carrière si laborieuse de ce savant, auquel la science de l'électricité doit une grande partie des progrès réalisés pendant ces vingt dernières années.

Le nom de Hopkinson a eu un retentissement considérable dans le monde entier ; aussi, la nouvelle de sa mort tragique a-t-elle évoqué les sympathies générales de tous les ingénieurs électriciens.

Le Dr Hopkinson, excursionniste passionné, qui passait ses vacances avec sa famille dans les montagnes de la Suisse, entreprit, accompagné d'un de ses fils et de deux de ses filles, l'ascension des Petites-Dents de Vésivé, considérée comme peu dangereuse.

Cette fois, comme d'habitude, il se passa des services d'un guide.

Quand, vers le soir, on s'aperçut que la petite troupe ne rentrait pas, on organisa des expéditions de recherche.

Les craintes que l'on avait ne furent que trop fondées, car, au fond d'un très-profond précipice, on trouva les corps du Dr Hopkinson et de ses trois enfants encore liés ensemble

John Hopkinson naquit à Manchester en 1849, commença son éducation scientifique à « Owen's College » et entra ensuite à l'Université de Londres.

C'est vers cette époque qu'apparurent ses premiers travaux scientifiques, notamment sur *la Thermodynamique*, sur *les Frottements moléculaires dans les vibrations des solides*, sur *la Rupture d'un fil de fer par le choc*.

Après avoir remporté à l'Université les récompenses les plus distinguées, le Dr Hopkinson porta son attention vers la pratique.

Au commencement de 1872, il entra comme ingénieur chez MM. Chance et Cie, fabricants d'appareils pour phares, et apporta aux mécanismes de ceux-ci plusieurs perfectionnements.

En même temps qu'il payait son tribut à l'industrie, il poursuivait ses études sur la technique de l'électricité et du magnétisme.

A partir de cette époque, le Dr Hopkinson fournit de nombreuses contributions aux diverses Sociétés scientifiques de Londres.

On peut citer notamment celles sur *la Charge résiduelle des bouteilles de Leyde*, sur *la Capacité électro-statique des corps*, sur *l'Action d'un aimant sur un courant électrique permanent*, sur *l'Indice de réfraction et la capacité inductive spécifique dans les milieux isolants transparents*, sur *le Système de distribution à trois fils*, qu'il inventa en 1882 et qui depuis s'est répandu dans le monde entier.

En 1883, le Dr Hopkinson produisit une étude importante sur *la Possibilité de coupler les alternateurs au parallèle*.

Vers la même époque apparurent ses Notes sur *l'Electromètre à quadrants* et sur *le Siège de la force électromotrice dans un couple voltaïque*.

En 1886, John Hopkinson et son frère, le Dr Edward Hopkinson, firent paraître une étude, marquant un progrès considérable, sur *le Circuit magnétique des dynamos*.

Les deux frères exposèrent, dans cette Note, comment la caractéristique à circuit ouvert d'une dynamo pouvait être *à priori* déterminée et la méthode d'Hopkinson, pour l'essai des dynamos, fut alors mentionnée pour la première fois.

Ces travaux apportèrent, dans la construction des dynamos, de très-nombreux perfectionnements et actuellement la méthode des frères Hopkinson est adoptée par tous les constructeurs électriciens.

Enfin, l'année dernière, il lut à la « Royal Society »

un Mémoire intitulé : *La Capacité et la charge résiduelle des diélectriques est influencée par la température et le temps.*

Le Dr Hopkinson fit partie de nombreuses Sociétés scientifiques anglaises, y compris la « Royal Society, » dont il était membre effectif.

Il occupa, à diverses reprises, le fauteuil présidentiel de « l'Institution of Electrical Engineers, » fit partie du bureau de la « British Association » et fut l'organisateur du corps « Royal Engineer Volunteers. »

John Hopkinson fut nommé plusieurs fois ingénieur-conseil de grandes installations d'électricité, soit pour l'éclairage, soit pour la traction

Tant comme théoricien que comme ingénieur, il a longtemps été regardé comme une des premières autorités.

Il est inutile de s'étendre davantage pour montrer combien fut grande l'influence que le Dr Hopkinson exerça sur le développement de la science électrique et sur les progrès de ses applications.

La fin tragique de sa carrière sera certainement déplorée non seulement par ses collègues, mais aussi par les modestes pionniers de science électrique.

SÉANCE DU 28 AOUT 1898.



Ont signé la liste de présence : MM. Baudelet, Bisacco-Palazzi, Briffaux, Cheftel, Colard, Compijn, De Bast, Della Riccia, de Ryckère, Guillaume, Henrion M., Manzoni, Maus, Micheels, Mugica, Robert Léon, Roland, Sacerdotti, Schiesari, Van der Wallen.

M. De Bast, vice-Président, au fauteuil.

M. De Bast, après avoir constaté que les procès-verbaux des séances des 27 mars et 24 avril ne donnent lieu à aucune observation, les déclare approuvés.

Il excuse l'absence de M. L'Hoest, Secrétaire-général, en mission.

Il donne ensuite la parole à **M. Colard**, pour sa communication intitulée :

Etude mathématique du système anti-inducteur Van Rysselberghe, sur les courtes lignes.

On sait qu'un poste télégraphique Morse muni du système anti-inducteur Van Rysselberghe comprend (fig. 1) deux graduateurs G de 500 ohms, 20 henrys ; un condensateur γ de 2 microfarads ; l'appareil récepteur a ; disposés par rapport à la terre, au manipulateur et à la ligne comme l'indique la figure.

En faisant abstraction de la résistance de la terre et de la capacité de la ligne ; en supposant aussi que l'appareil récepteur a les mêmes constantes (résistance et coefficient de self-induction) que les graduateurs, l'ensemble des deux

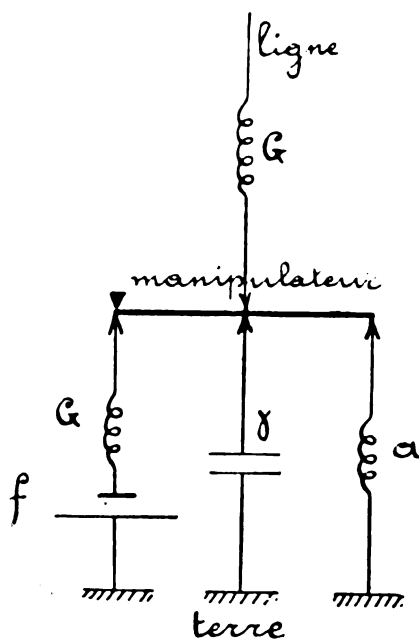


Fig. 1.

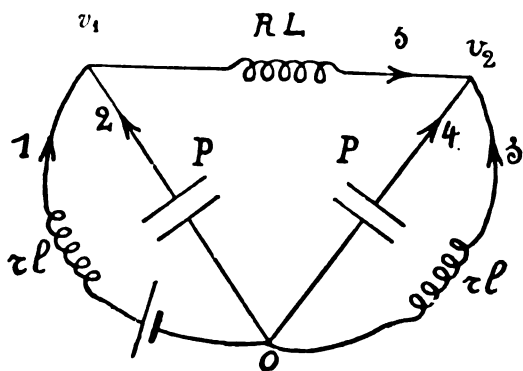


Fig. 2.

postes correspondants, de la ligne intermédiaire et de la terre, se présente comme l'indique la fig. 2, R et L sont respectivement la résistance et le coefficient de self-induction de la ligne et de ses deux graduateurs d'extrémités ; r et l sont les mêmes constantes relatives soit au graduateur de pile, soit au récepteur ; $P = \frac{I}{\gamma}$ est l'inverse de la capacité du condensateur ; f est la force électromotrice de la pile du poste transmetteur. Nous faisons abstraction aussi de la résistance de cette pile.

Désignons par i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 , les intensités des courants prises positivement dans le sens des flèches disposées sur les différentes branches du réseau ; et par v_1 et v_2 les potentiels électriques aux points d'insertion des condensateurs ; nous prendrons pour zéro des potentiels le potentiel de la terre.

* * *

Conditions aux limites. — A l'état de régime on aura, le manipulateur étant à la position de travail, et en désignant par I l'intensité de régime du courant dans la ligne, égale à $\frac{f}{R + 2r}$,

$$i_1 = -i_3 = i_5 = I$$

$$i_2 = i_4 = 0$$

$$v_1 = I(R + r)$$

$$v_2 = I r$$

Au moment où l'on abaisse le manipulateur du poste transmetteur, les coefficients de self induction empêchent les courants i_1, i_3, i_5 de varier brusquement ; non plus par conséquent que les charges des condensateurs ; par suite les courants i_2, i_4 et les potentiels v_1 et v_2 varieront aussi d'une façon continue. On aura donc :

$$i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = i_5 = v_1 = v_2 = 0.$$

Au moment de l'ouverture du manipulateur, le récepteur a du poste transmetteur vient brusquement se substituer au graduateur de pile G de ce poste. A cause de son coefficient de self induction, ce récepteur ne permet au courant qui le traverse qu'une variation graduelle; le coefficient de self-induction de la ligne (y compris ses graduateurs d'extrémités) empêche aussi le courant i_3 de la ligne de varier brusquement. Il en résulte que, au moment de l'ouverture, c'est le condensateur de la branche 2 qui fournira à la ligne la totalité du courant I . On aura donc, à ce moment de l'ouverture

$$i_1 = 0 \quad i_2 = -i_3 = i_3 = I \quad i_4 = 0 \quad v_1 = I(R + r) \quad v_2 = Ir.$$

Enfin, l'état de régime après l'ouverture sera, la force électromotrice f étant retirée du circuit :

$$i_1 - i_2 = i_3 = i_4 = i_3 - v_1 - v_2 = 0.$$

Nous n'envisagerons pas les phénomènes dont est le siège le graduateur de pile du poste transmetteur au moment de sa mise hors circuit ou après ce moment. L'intensité du courant dans ce graduateur, au moment de cette mise hors circuit et pendant le temps qui la suit, est une fonction de la résistance de l'étincelle qui jaillit au contact de travail du manipulateur, résistance qui est elle-même une fonction inconnue du temps. Nous négligerons donc l'influence de cette étincelle sur tout le circuit.

* * *

Équation caractéristique du réseau. — J'adopterai les notations et la méthode de recherche que j'ai exposées dans le *Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore* (1896-1897,

tome VIII, 2^e série, pages 332 et suivantes). Cela me permettra de poser directement les résultats analytiques.

L'équation caractéristique du réseau est, en posant

$$\begin{array}{c}
 lx^2 + rx = \varphi \qquad Lx^2 + Rx = \Phi \\
 \left| \begin{array}{cccccc}
 \varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\
 0 & P & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\
 0 & 0 & \varphi & 0 & 0 & 0 & x \\
 0 & 0 & 0 & P & 0 & 0 & x \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi & -x & x \\
 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0
 \end{array} \right| = 0
 \end{array}$$

Toutes réductions faites et en ne nous occupant pas des racines x nulles, pour les raisons données dans le Mémoire cité, cette équation devient

$$(P + \varphi)^2 \Phi + 2P\varphi(P + \varphi) = 0$$

qui donne

$$P + \varphi = 0 \quad \text{et} \quad (P + \varphi)\Phi + 2P\varphi = 0$$

La première de ces deux équations est du second degré en x ; la seconde, abstraction faite d'une racine x nulle, est du troisième degré en x . Cette équation du troisième degré se résout en une équation du premier degré et une équation du second degré si $\Phi = 2\varphi$ notamment. Tel sera le cas si nous négligeons la résistance et le coefficient de self-induction de la ligne proprement dite vis-à-vis des quantités correspondantes ($2r = 1000$; $2l = 40$) relatives aux deux graduateurs de ligne. Notre analyse ne s'appliquera donc qu'aux courtes lignes, ce qui rendra plus légitimes notre supposition que la capacité de la ligne peut être négligée. Cette simplification

nous permettra de conserver les symboles algébriques jusqu'au bout de nos calculs, ce qui, certes, présentera un avantage notable.

Dans ces conditions, l'équation caractéristique se résout en trois équations, savoir

$$P + \varphi = 0 \text{ racines } x_1 \text{ ou } x_2.$$

$$\varphi = 0 \text{ racine } x_3, \text{ abstraction faite de la racine nulle.}$$

$$2 P + \varphi = 0 \text{ racines } x_4 \text{ ou } x_5.$$

On aura donc cinq constantes distinctes d'intégration, lesquelles devront pouvoir être déterminées par cinq conditions aux limites, physiquement distinctes, et qui seront nécessaires et suffisantes pour déterminer complètement l'état électrique du réseau.

Après substitution de l'une ou l'autre de ces racines, on aura

$$\varphi_1 = \varphi_2 = -P$$

$$\varphi_3 = 0$$

$$\varphi_4 = \varphi_5 = -2P.$$

D'ailleurs, la première équation en x étant

$$lx^2 + rx + P = 0$$

on aura

$$x_1 = \frac{-r + \sqrt{r^2 - 4lP}}{2l} \quad x_2 = \frac{-r - \sqrt{r^2 - 4lP}}{2l}$$

$$x_1 x_2 = \frac{P}{l} \quad x_1 + x_2 = -\frac{r}{l}.$$

Nous poserons

$$x_1 = \alpha + \beta_1 \sqrt{-1} \quad x_2 = \alpha - \beta_1 \sqrt{-1}$$

$$\alpha = -\frac{r}{2l} \quad \beta_1 = \frac{\sqrt{4lP - r^2}}{2l} \quad \alpha^2 + \beta_1^2 = \frac{P}{l}.$$

La seconde équation est, abstraction faite de la racine nulle,

$$lx + r = 0$$

qui donne

$$x_3 = -\frac{r}{l}.$$

La troisième équation est

$$lx^2 + rx + 2P = 0$$

d'où l'on déduit

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{-r + \sqrt{r^2 - 8lP}}{2l} & x_2 &= \frac{-r - \sqrt{r^2 - 8lP}}{2l} \\ x_1 x_2 &= \frac{2P}{l} & x_1 + x_2 &= -\frac{r}{l} \end{aligned}$$

Nous poserons

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha + \beta_2 \sqrt{-1} & x_2 &= \alpha - \beta_2 \sqrt{-1} \\ \alpha &= -\frac{r}{2l} & \beta_2 &= \frac{\sqrt{8lP - r^2}}{2l} & \alpha^2 + \beta_2^2 &= \frac{2P}{l}. \end{aligned}$$

Tous ces résultats nous seront utiles dans les calculs qui suivent.

* * *

Constantes de réaction. — D'après les valeurs de x , on voit que :

1^o) Aux racines x_1 x_2 correspondra un état oscillatoire ou non selon que $(r^2 - 4lP)$ sera négatif ou positif. Dans nos hypothèses, on aura

$$\begin{aligned} r &= 500 & l &= 20 & P &= \frac{10^6}{2} \\ r^2 - 4lP &= -39,75 \times 10^6 \end{aligned}$$

L'état correspondant sera donc *oscillatoire* ; la fréquence n_1 sera telle que

$$2\pi n_1 = \frac{\sqrt{4lP - r^2}}{2l} \quad \text{ou} \quad n_1 = 25$$

Elle correspond à très peu près à la fréquence du son sol₂. Le facteur d'amortissement de ces oscillations est $-\frac{r}{2l} = 12,5$; il sera tel que, abstraction faite de la vibration, l'intensité sera réduite à la moitié, au 1/4, au 1/8, 1/16, au 1/32, après 0,24 ; 0,48 ; 0,72 ; 0,96 ; 1,20 ... seconde.

2^o) A la racine $x_3 = -\frac{r}{l} = -25$ correspond un état électrique *non oscillatoire*, s'amortissant suivant le facteur exponentiel -25 ; tel, par conséquent, que l'intensité soit réduite à la moitié, au 1/4, au 1/8, au 1/16, au 1/32 ... après 0,12 ; 0,24 ; 0,36 ; 0,48 ; 0,60 ... seconde.

3^o) Aux racines x_1 et x_2 correspondra un état *oscillatoire* de fréquence n_2 donnée par l'égalité

$$2\pi n_2 = \frac{\sqrt{8lP - r^2}}{2l} \quad \text{ou} \quad n_2 = 35,6.$$

Elle correspond à la fréquence d'un son intermédiaire entre ut₋₁ dièse et ré₋₁. Le facteur d'amortissement $-\frac{r}{2l}$ est le même que pour les deux premières racines.

* * *

État électrique du réseau. — L'état électrique total sera donc la superposition de quatre états qui sont :

1^o) Une oscillation de fréquence 25 (sol₂), amortie suivant le facteur 12,5 ;

2^o) Une variation exponentielle non oscillatoire, amortie suivant le facteur 25 ;

3^o) Une oscillation de fréquence 35,6 (entre ut₋₁ dièze et ré₋₁), amortie suivant le facteur 12,5 ;

4^o) L'état de régime.

* * *

Calcul des mineurs du déterminant caractéristique. Valeurs des i et des v.

1^o) Pour $\varphi + P = 0$, c'est-à-dire pour $x = x_1$ ou x_2 , ces mineurs, pris alternativement en signes contraires, sont entre eux comme

$$-x : x : -x : x : 0 : -P : -P.$$

2^o) Pour $\varphi = 0$, c'est-à-dire pour $x = x_3$, ils sont entre eux comme

$$1 : 0 : -1 : 0 : 1 : 0 : 0.$$

3^o) Pour $\varphi + 2P = 0$, c'est-à-dire pour $x = x_4$ ou x_5 , ils sont entre eux comme

$$Px : \varphi x : -Px : -\varphi x : x(\varphi + P) : -P\varphi : P\varphi$$

on encore, comme

$$x : -2x : -x : 2x : -x : 2P : -2P.$$

Par conséquent, en désignant par A, B, C, D, E, cinq

constantes d'intégration dont les valeurs dépendront des conditions aux limites, la *partie variable* de l'état électrique, non compris par conséquent l'état de régime, sera donnée par les relations :

$$\begin{aligned}
 i_1 &= -A x_1 e x_1 t - B x_2 e x_2 t + C e x_3 t + D x_1 e x_1 t + E x_3 e x_3 t \\
 i_2 &= -A x_1 e x_1 t + B x_2 e x_2 t - C o e x_3 t - 2D x_1 e x_1 t - 2E x_3 e x_3 t \\
 i_3 &= -A x_1 e x_1 t - B x_2 e x_2 t - C e x_3 t - D x_1 e x_1 t - E x_3 e x_3 t \\
 i_4 &= -A x_1 e x_1 t + B x_2 e x_2 t + C o e x_3 t + 2D x_1 e x_1 t + 2E x_3 e x_3 t \\
 i_5 &= -A o e x_1 t + B o e x_2 t + C e x_3 t - D x_1 e x_3 t - E x_3 e x_1 t \\
 v_1 &= -A P e x_1 t - B P e x_2 t + C o e x_3 t + 2D P e x_1 t + 2E P e x_3 t \\
 v_2 &= -A P e x_1 t - B P e x_2 t + C o e x_3 t - 2D P e x_1 t - 2E P e x_3 t
 \end{aligned}$$

dans lesquelles e représente la base du système des logarithmes népériens.

Ces valeurs renferment des quantités imaginaires ; mais la combinaison de ces imaginaires doit être telle qu'il en résulte seulement des quantités réelles. Les constantes A et B seront donc imaginaires conjuguées ; de même que les constantes D et E .

Remarquons d'ailleurs que

$$\begin{aligned}
 &(M + N\sqrt{-1}) e^{(\alpha + \beta\sqrt{-1})t} + (M - N\sqrt{-1}) e^{(\alpha - \beta\sqrt{-1})t} \\
 &= 2 e^{\alpha t} (M \cos \beta t - N \sin \beta t)
 \end{aligned}$$

et que

$$\begin{aligned}
 &(M + N\sqrt{-1})(\alpha + \beta\sqrt{-1}) = (\alpha M - \beta N) + (\beta M + \alpha N)\sqrt{-1} \\
 &(M - N\sqrt{-1})(\alpha - \beta\sqrt{-1}) = (\alpha M - \beta N) - (\beta M + \alpha N)\sqrt{-1}
 \end{aligned}$$

Dans ces conditions, et en représentant par A, B, C, D, E de nouvelles constantes, on obtient, pour la *partie variable*

$$i_1 = -e^{\alpha t}[(\alpha A - \beta_1 B) \cos \beta_1 t - (\beta_1 A + \alpha B) \sin \beta_1 t] + C e^{\alpha_3 t} \\ + e^{\alpha t}[(\alpha D - \beta_2 E) \cos \beta_2 t - (\beta_2 D + \alpha E) \sin \beta_2 t]$$

$$i_2 = e^{\alpha t}[(\alpha A - \beta_1 B) \cos \beta_1 t - (\beta_1 A + \alpha B) \sin \beta_1 t] \\ - 2 e^{\alpha t}[(\alpha D - \beta_2 E) \cos \beta_2 t - (\beta_2 D + \alpha E) \sin \beta_2 t]$$

$$i_3 = -e^{\alpha t}[(\alpha A - \beta_1 B) \cos \beta_1 t - (\beta_1 A + \alpha B) \sin \beta_1 t] - C e^{\alpha_3 t} \\ - e^{\alpha t}[(\alpha D - \beta_2 E) \cos \beta_2 t - (\beta_2 D + \alpha E) \sin \beta_2 t]$$

$$i_4 = e^{\alpha t}[(\alpha A - \beta_1 B) \cos \beta_1 t - (\beta_1 A + \alpha B) \sin \beta_1 t] \\ + 2 e^{\alpha t}[(\alpha D - \beta_2 E) \cos \beta_2 t - (\beta_2 D + \alpha E) \sin \beta_2 t]$$

$$i_5 = C e^{\alpha_3 t} - e^{\alpha t}[(\alpha D - \beta_2 E) \cos \beta_2 t - (\beta_2 D + \alpha E) \sin \beta_2 t]$$

$$v_1 = -P e^{\alpha t} [A \cos \beta_1 t - B \sin \beta_1 t] \\ + 2P e^{\alpha t} [D \cos \beta_2 t - E \sin \beta_2 t]$$

$$v_2 = -P e^{\alpha t} [A \cos \beta_1 t - B \sin \beta_1 t] \\ - 2P e^{\alpha t} [D \cos \beta_2 t - E \sin \beta_2 t]$$

Pour $t = 0$, cette *partie variable* se réduit à

$$i_1 = -(\alpha A - \beta_1 B) + C + (\alpha D - \beta_2 E)$$

$$i_2 = (\alpha A - \beta_1 B) - 2(\alpha D - \beta_2 E)$$

$$i_3 = -(\alpha A - \beta_1 B) - C - (\alpha D - \beta_2 E)$$

$$i_4 = (\alpha A - \beta_1 B) + 2(\alpha D - \beta_2 E)$$

$$i_5 = + C - (\alpha D - \beta_2 E)$$

$$v_1 = -PA + 2PD$$

$$v_2 = -PA - 2PD$$

La valeur de ces constantes dépendra des conditions aux limites, qui sont ici des conditions initiales, et de l'état de régime.

* * *

Cas de la fermeture du circuit. — L'état total s'obtient, en ajoutant à la partie variable ci-dessus, l'état de régime qui est

$$i_2 = i_4 = 0 \quad i_1 = -i_3 = i_5 = I \quad v_1 = I(R+r) \quad v_2 = I r$$

Au moment de la fermeture, c'est-à-dire pour $t = 0$, on aura pour les valeurs *totales*

$$i_1 = 0 \quad i_2 = 0 \quad i_3 = 0 \quad i_4 = 0 \quad i_5 = 0 \quad v_1 = 0 \quad v_2 = 0$$

ce qui constitue les conditions aux limites. Ces sept conditions ne sont pas physiquement distinctes. Choisissons-en cinq qui soient distinctes, par exemple

$$i_1 = i_2 = i_3 = 0 \quad v_1 = v_2 = 0$$

Nous obtenus ainsi, pour déterminer les cinq constantes A, B, C, D, E, les cinq équations de conditions :

$$\begin{aligned} -\alpha A + \beta_1 B + C + \alpha D - \beta_2 E &= -I \\ \alpha A - \beta_1 B - 2\alpha D + 2\beta_2 E &= 0 \\ -\alpha A + \beta_1 B - C - \alpha D + \beta_2 E &= I \\ -PA &+ 2PD &= -I(R+r) \\ -PA &- 2PD &= -Ir \end{aligned}$$

On en déduit

$$\begin{aligned} PA &= \frac{I(R+r)}{2} & PB &= \frac{I\alpha(R+2r)}{2\beta_1} & C &= -I \\ 2PD &= -\frac{IR}{2} & 2PE &= -\frac{I\alpha R}{2\beta_2} \\ \alpha A - \beta_1 B &= 0; \beta_1 A + \alpha B &= I \frac{R+2r}{2P} \left(\frac{\beta_1^2 + \alpha^2}{\beta_1} \right) &= I \frac{R+2r}{2\beta_1 l} \\ \alpha D - \beta_2 E &= 0; \beta_2 D + \alpha E &= -I \frac{R}{4P} \left(\frac{\beta_2^2 + \alpha^2}{\beta_2} \right) &= -I \frac{R}{2\beta_2 l} \end{aligned}$$

En y substituant les valeurs numériques

$$R = 2r = 1000 \quad P = 5 \times 10^5 \quad \alpha = -12,5 \quad \beta_1 = 157,6 \\ \beta_2 = 223 \quad l = 20$$

il vient

$$PA = 11000; PB = -179,315; C = -1; 2PD = -1500 \\ 2PE = 128,0275 \\ \alpha A - \beta_1 B = 0 \quad \beta_1 A + \alpha B = 10,31725 \\ \alpha D - \beta_2 E = 0 \quad \beta_2 D + \alpha E = -10,1121$$

et enfin les expressions *totales* des i et des v deviennent, en remarquant que

$$R + r = 1500 \\ r = 500$$

$$\frac{i_1}{I} = e^{-12,5t} (0,31725 \sin 157,6t + 0,1121 \sin 223t) - e^{-2t} + 1$$

$$\frac{i_2}{I} = e^{-12,5t} (-0,31725 \sin 157,6t - 0,2242 \sin 223t)$$

$$\frac{i_3}{I} = e^{-12,5t} (0,31725 \sin 157,6t - 0,1121 \sin 223t) + e^{-2t} - 1$$

$$\frac{i_4}{I} = e^{-12,5t} (-0,31725 \sin 157,6t + 0,2242 \sin 223t)$$

$$\frac{i_5}{I} = e^{-12,5t} (-0,1121 \sin 223t) - e^{-2t} + 1$$

$$\frac{v_1}{I} = e^{-12,5t} (-1000 \cos 157,6t - 79,315 \sin 157,6t \\ - 500 \cos 223t - 28,0275 \sin 223t) + 1500$$

$$\frac{v_2}{I} = e^{-12,5t} (-1000 \cos 157,6t - 79,315 \sin 157,6t \\ + 500 \cos 223t + 28,0275 \sin 223t) + 500$$

* * *

Phénomènes électriques de la ligne. — La ligne agit par induction sur les lignes voisines (télégraphiques ou téléphoniques) de deux façons : 1° *par les variations de l'intensité du courant* qui, grâce aux coefficients d'induction mutuelle des lignes voisines par rapport à notre ligne, produisent dans ces lignes voisines des forces électromotrices dues par conséquent à *l'induction électro-magnétique* ; 2° *par les variations de son potentiel électrique moyen*, qui, grâce à la capacité des lignes voisines par rapport à notre ligne, produisent dans ces lignes voisines des courants de charge ou de décharge dus par conséquent à *l'induction électro-statique*. Remarquons en passant que la présence de cette capacité mutuelle constitue un facteur *principal* dans les phénomènes d'induction dont les lignes voisines sont le siège, mais ne constitue qu'un simple *facteur de correction* dans les phénomènes de notre ligne télégraphique. C'est pourquoi, d'ailleurs, nous avons négligé la capacité de cette ligne, capacité qui, si la ligne est courte, n'intervient que comme correction dans les résultats que nous avons obtenus.

1° *Le courant i , dans la ligne* contient une partie ondulatoire

$$\frac{i}{I} = -0,1121 e^{-12,5t} \sin 223 t$$

qui pourra influencer les lignes téléphoniques voisines.

Sa fréquence est, nous l'avons établi, 35 6 et correspond à celle d'un son intermédiaire entre ut₁ dièse et ré₁.

i est nul pour $223t = k\pi$, k étant un nombre entier quelconque, ou pour $t = 0,0141 k$.

Les maxima et minima correspondent à

$$12,5 e^{-12,5t} \sin 223 t - 223 e^{-12,5t} \cos 223 t = 0$$

ou

$$t = 0,00677 + 0,0141 k.$$

Les premiers maxima, minima ou zéros seront tels que l'indique le tableau ci-dessous

t secondes	i I
0	0
0,00677	— 0,111
0,0141	0
0,02087	+ 0,1042
0,0282	0
0,03497	— 0,101
0,0423	0
0,04907	+ 0,0978
0,0564	0
0,06317	— 0,0932
0,0705	0
0,07727	+ 0,0898
⋮	⋮
⋮	⋮

L'on voit que, pour de faibles valeurs de t , la partie sinusoïdale i du courant i_s de la ligne a des intensités maxima et minima voisines de 10 % de l'intensité du courant de régime I dans la ligne. Elle décroît assez lentement, puisque après 0,8 de seconde (soit après environ 28,5 oscillations doubles) son intensité maxima n'est encore réduite qu'au dixième environ de sa valeur primitive, soit à 1 % environ de l'intensité du courant I de régime.

2° Le potentiel moyen de la ligne v_m est égal à $\frac{v_1 + v_2}{2}$ soit

$$\frac{v_m}{I} = -e^{-12,5t} (1000 \cos 157,6t + 79,315 \sin 157,6t) + 1000 \\ - 1000 - 1000 e^{-12,5t} \sin (157,6t + 85^\circ, 25')$$

La partie oscillatoire est

$$\frac{v}{I} = -1000 e^{-12,5t} \sin (157,6 + 85^{\circ}25')$$

Son amortissement est le même que celui du courant oscillatoire dans la ligne ; mais sa fréquence est de 25 seulement, correspondant à celle du son sol₂. *Ses premières valeurs maxima et minima sont voisines de celles du potentiel de régime*, 1 000 I en valeur absolue.

* * *

Ainsi, l'induction électrostatique tend, dans les conditions où nous nous sommes placés, à produire dans les récepteurs téléphoniques desservis par les fils voisins, un son qui est à peu près à la quinte inférieure du son que tend à produire l'induction électro-magnétique. La partie active du courant de la ligne est à peu près, à l'origine, égale à 10 % du courant de régime ; la partie active du potentiel de la ligne est à peu près, à l'origine, égale à 100 % du potentiel de régime. Courant et potentiel actifs diminuent suivant l'exposant exponentiel $-12,5 t$.

* * *

Cas de l'ouverture du circuit. — Après que le manipulateur du poste transmetteur a été relevé, substituant ainsi un appareil transmetteur au repos au graduateur de pile, l'état de régime est caractérisé par

$$i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = i_5 = 0 \quad v_1 = v_2 = 0.$$

Si nous supposons le régime établi au moment de l'ouverture, on a, à ce moment de l'ouverture, c'est-à-dire pour $t = 0$,

$$\begin{array}{cccccc} i_1 = 0 & i_2 = I & i_3 = -I & i_4 = 0 & i_5 = I \\ & v_1 = I(R+r) & & v_2 = Ir & \end{array}$$

Les courants et potentiels totaux se réduisent à leur partie variable.

Les sept conditions initiales ne sont pas physiquement distinctes. Choisissons-en cinq qui soient distinctes, par exemple

$$i_1 = 0 \quad i_2 = I \quad i_3 = -I \quad v_1 = I(R + r) \quad v_2 = Ir$$

On aura ainsi, pour déterminer les cinq constantes A, B, C, D, E, les cinq relations :

$$\begin{aligned} -\alpha A + \beta_1 B + C + \alpha D - \beta_2 E &= 0 \\ \alpha A - \beta_1 B - 2\alpha D + 2\beta_2 E &= I \\ -\alpha A + \beta_1 B - C - \alpha D + \beta_2 E &= -I \\ -PA + 2PD &= I(R + r) \\ -PA - 2PD &= Ir \end{aligned}$$

On en déduit :

$$PA = -\frac{I(R + 2r)}{2} \quad PB = -I \frac{P + \alpha(R + 2r)}{2\beta_1}$$

$$C = \frac{3}{4}I \quad 2PD = \frac{IR}{2} \quad 2PE = I \frac{P + \alpha R}{2\beta_2}$$

$$\alpha A - \beta_1 B = \frac{I}{2}$$

$$\beta_1 A + \alpha B = -I \frac{\alpha P + (\alpha^2 + \beta_1^2)(R + 2r)}{2P\beta_1} = -I \frac{\alpha + \frac{R + 2r}{l}}{2\beta_1}$$

$$\alpha D - \beta_2 E = -\frac{I}{4}$$

$$\beta_2 D + \alpha E = I \frac{\alpha P + (\alpha^2 + \beta_2^2)R}{4P\beta_2} = I \frac{\alpha + \frac{2R}{l}}{4\beta_2}$$

ou, tous calculs faits :

$$\begin{aligned} P A &= -11000 & P B &= -11506,8 & 2 P D &= 1500 \\ 2 P E &= 11095,25 \\ \alpha A - \beta_1 B &= 10,5 & \beta_1 A + \alpha B &= -10,2776 \\ \alpha D - \beta_2 E &= -10,25 & \beta_2 D + \alpha E &= 10,098095 \end{aligned}$$

Les expressions *totales* des courants et des potentiels deviennent alors

$$\begin{aligned} \frac{i_1}{I} &= e^{-12,5t} (-0,5 \cos 157,6 t - 0,2776 \sin 157,6 t \\ &\quad - 0,25 \cos 223 t - 0,098095 \sin 223 t) + 0,75 e^{-25t} \\ \frac{i_2}{I} &= e^{-12,5t} (0,5 \cos 157,6 t + 0,2776 \sin 157,6 t \\ &\quad + 0,5 \cos 223 t + 0,19619 \sin 223 t) \\ \frac{i_3}{I} &= e^{-12,5t} (-0,5 \cos 157,6 t - 0,2776 \sin 157,6 t \\ &\quad + 0,25 \cos 223 t + 0,098095 \sin 223 t) - 0,75 e^{-25t} \\ \frac{i_4}{I} &= e^{-12,5t} (0,5 \cos 157,6 t + 0,2776 \sin 157,6 t \\ &\quad - 0,5 \cos 223 t - 0,19619 \sin 223 t) \\ \frac{i_5}{I} &= e^{-12,5t} (0,25 \cos 223 t + 0,098095 \sin 223 t) + 0,75 e^{-25t} \\ \frac{v_1}{I} &= e^{-12,5t} (11000 \cos 157,6 t - 11506,8 \sin 157,6 t \\ &\quad + 500 \cos 223 t - 11095,25 \sin 223 t) \\ \frac{v_2}{I} &= e^{-12,5t} (11000 \cos 157,6 t - 11506,8 \sin 157,6 t \\ &\quad - 500 \cos 223 t + 11095,25 \sin 223 t) \end{aligned}$$



* * *

Phénomènes électriques de la ligne.

1° Le courant i , de la ligne comprend une partie oscillatoire

$$\begin{aligned}\frac{i}{I} &= e^{-12.5t} (0,25 \cos 223 t + 0,098095 \sin 223 t) \\ &= 0,269 e^{-12.5t} \sin (223 t + 68^{\circ} 35')\end{aligned}$$

2° Le potentiel moyen de la ligne est $v_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$ ou

$$\begin{aligned}\frac{v_m}{I} &= e^{-12.5t} (1\,000 \cos 157,6 t - 1\,506,8 \sin 157,6 t) \\ &= 1\,860 e^{-12.5t} \cos (157,6 t + 35^{\circ} 40')\end{aligned}$$

Les fréquences et l'amortissement sont donc encore les mêmes que dans le cas de la fermeture du circuit. Mais en nous reportant aux valeurs trouvées dans ce cas pour i et v , on voit que, dans le second cas, la partie active du courant, au point de vue de l'induction téléphonique, est 2,4 fois plus intense, et la partie active du potentiel est 1,86 fois plus intense.

Les phénomènes d'induction seront donc environ deux fois plus marqués au moment de l'ouverture du circuit (fin du signal) qu'au moment de la fermeture (commencement du signal).

CONCLUSION. — Il résulte de l'étude ci-dessus que les courants et les potentiels, dans les circuits télégraphiques, anti-inductés suivant le système Van Rysselberghe, sont très-loin d'avoir la forme simplement amortie (caractéristique du courant dans un circuit simple ne comprenant, par exemple, que des résistances et des coefficients de

self-induction). Par suite de la présence combinée des capacités, des résistances et des coefficients de self-induction, les courants et les potentiels prennent des amortissements oscillatoires. J'ai déterminé l'ordre de grandeur de deux oscillations principales dans le cas des lignes courtes. Toute théorie de l'induction télégrapho-téléphonique, dans le système Van Rysselberge, devra tenir compte de ces oscillations si elle veut se rapprocher de la réalité des faits. Outre que j'ai élucidé des phénomènes restés indécis jusqu'à présent et qui sont de la plus grande portée au point de vue du but même du système, je crois avoir établi une base solide pour des études ultérieures relatives à l'induction.

(Applaudissements.)

M. Robert fait remarquer que, probablement, on améliorerait la transmission en supprimant le condensateur du poste récepteur, à condition de l'introduire au poste transmetteur au moment de la rupture, chose que l'on pourrait sans doute réaliser sans trop de difficultés pratiques.

M. Colard aborde ensuite sa seconde communication sur

L'intensité du courant téléphonique reçu dans le système de téléphonie et de télégraphie simultanées de Van Rysselberge.

On sait que dans ce système les appareils sont disposés comme l'indique la fig. 1.

Nous admettrons pour les graduateurs un coefficient de self-induction assez faible (10 H) à cause de la très faible intensité des courants téléphoniques. Nous suppo-

MoU

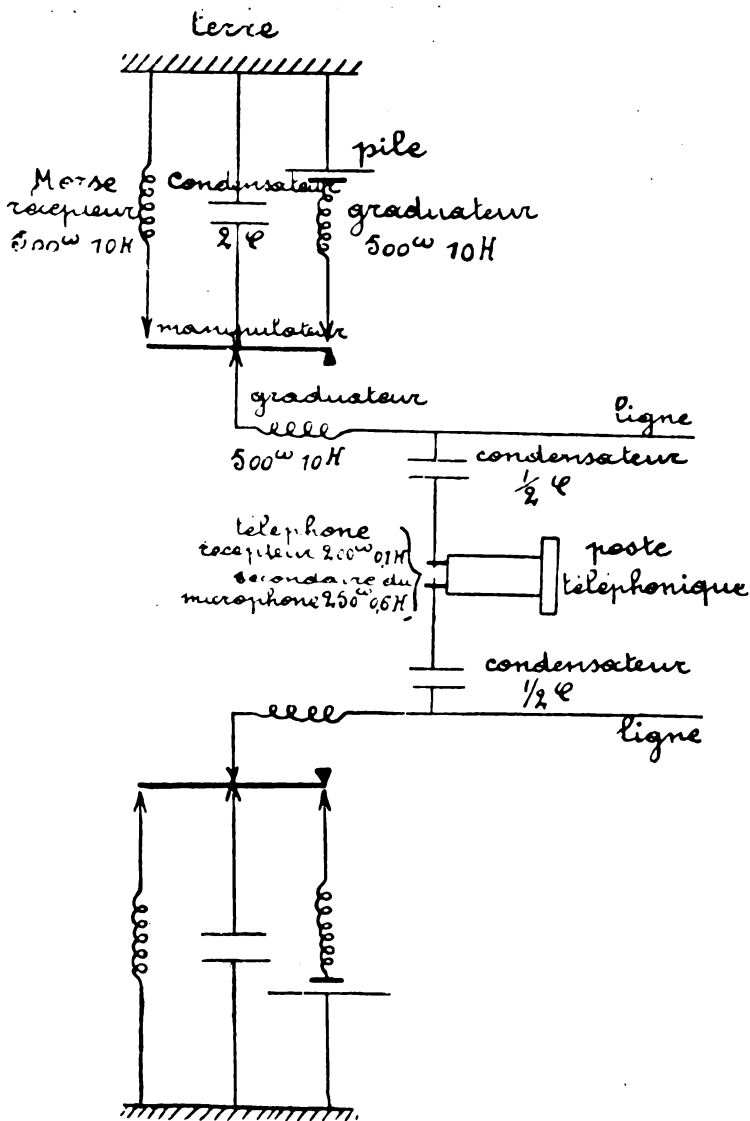


Fig. 1.

serons, pour plus de simplicité, que le récepteur télégraphique a la même résistance et le même coefficient de self-induction que le graduateur : dans cette hypothèse, les dérivations téléphoniques par les postes télégraphiques sont les mêmes, que le manipulateur soit à la position de travail ou à la position de repos : nous négligerons la résistance et la capacité de la pile. Nous ne

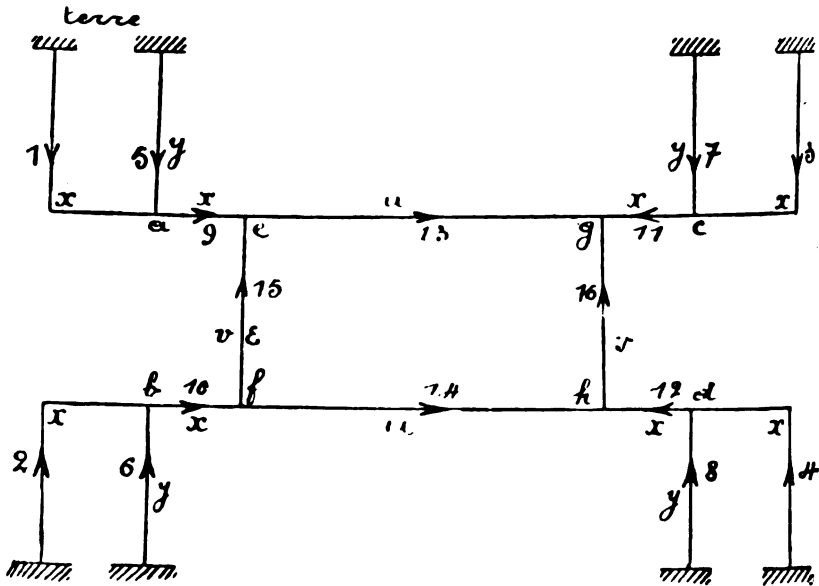


Fig. 2.

tiendrons pas non plus compte de la capacité ni du coefficient de self-induction de la ligne : notre analyse visera donc les lignes courtes Enfin, nous négligerons aussi la résistance de la terre.

Nous supposerons que la force électromotrice appliquée dans le secondaire du microphone transmetteur est une force sinusoïdale simple de la forme $E \sin 2\pi Nt$ ou

E $\sin pt$; et nous calculerons l'intensité maxima et le décalage du courant reçu dans le récepteur téléphonique correspondant. Nous admettrons, au surplus, que le régime est établi.

Dans ces hypothèses, le réseau se présente comme l'indique le schéma fig. 2. Nous adopterons la méthode de calcul exposée par M. Steinmetz dans son ouvrage « *Theory and calculation of alternating current phenomena* ». Une branche du réseau de résistance ohmique r , de coefficient de self-induction l , et dans laquelle est embroché un condensateur de capacité c aura une impédance représentée en notations complexes par

$$r - \left(pl - \frac{1}{pc} \right) \sqrt{-1}$$

et une fonction sinusoïdale de valeur maxima F , décalée d'un angle φ , sera représentée par

$$F \cos \varphi - F \sin \varphi \sqrt{-1} = m - n \sqrt{-1}.$$

La tangente de l'angle de décalage sera

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{n}{m}$$

et la valeur maxima sera

$$F = \sqrt{m^2 + n^2}.$$

Lorsque les forces électromotrices, les courants et les impédances sont ainsi représentées par des fonctions complexes, on peut leur appliquer directement la loi d'ohm et les lemmes de Kirchhoff, comme s'il s'agissait de courants continus. Les calculs analytiques sont de la sorte considéra-

blement simplifiés ; il faut remarquer toutefois que les substitutions numériques dans les équations finales n'en restent pas moins extrêmement pénibles.

Nous appellerons x l'impédance d'un graduateur ou d'un récepteur télégraphique ; y celle d'un condensateur de 2 microfarads ; u celle d'un des fils de la ligne ; v celle d'un des circuits téléphoniques intercalés entre les deux lignes, y compris les deux condensateurs de $\frac{1}{2}$ microfarad servant de séparateurs. Nous numéroterons les courants comme il est indiqué sur le schéma fig. 2, le sens indiqué par les flèches disposées sur les diverses branches étant pris comme sens positif ; nous désignerons par $a, b, c, \dots$ les potentiels aux différents nœuds, le potentiel de la terre étant choisi comme zéro des potentiels. Enfin, nous désignerons par $z = E$, en notations complexes, la force électromotrice sinusoïdale de fréquence $N = \frac{f}{2\pi}$ appliquée dans la branche 15.

Appliquons la loi d'Ohm en diverses branches du réseau. Nous aurons

$$\begin{aligned} -a &= i_1 x = i_5 y \\ -b &= i_2 x = i_6 y \quad (1) \\ -c &= i_3 x = i_7 y \\ -d &= i_4 x = i_8 y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a - e &= i_9 x \\ b - f &= i_{10} x \quad (2) \\ c - g &= i_{11} x \\ d - h &= i_{12} x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e - g &= i_{15} u \\ f - h &= i_{14} u \quad (3) \\ f - e + \mathfrak{E} &= i_{13} v \\ h - g &= i_{16} v \end{aligned}$$

Appliquons ensuite la loi de continuité de Kirchoff à chacun des nœuds (sauf à la terre),

$$\begin{aligned} i_1 + i_3 &= i_9 \\ i_2 + i_6 &= i_{10} \\ i_3 + i_7 &= i_{11} \\ i_4 + i_8 &= i_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_9 + i_{13} &= i_{15} \\ i_{10} &= i_{13} + i_{11} \\ i_{13} + i_{11} + i_{16} &= 0 \\ i_{11} + i_{12} &= i_{16} \end{aligned} \quad (5)$$

Nous aurons ainsi en tout 24 équations, d'où nous pourrions déduire les 16 intensités de courant et les 8 potentiels aux nœuds.

Ce qui nous intéresse, c'est la valeur du courant reçu i_{16} . Nous éliminerons donc successivement les autres courants et les potentiels.

Éliminons d'abord a, b, c et d des équations (1). Elles se réduisent à

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{y}{x} i_3 \\ i_2 &= \frac{y}{x} i_6 \\ i_3 &= \frac{y}{x} i_7 \\ i_4 &= \frac{y}{x} i_8 \end{aligned} \quad (6)$$

Éliminons a, b, c et d entre les systèmes (1) et (2). Nous obtenons

$$\begin{aligned} e &= -i_3 y - i_9 x \\ f &= -i_6 y - i_{10} x \\ g &= -i_7 y - i_{11} x \\ h &= -i_8 y - i_{12} x \end{aligned} \quad (7)$$

Ces valeurs introduites dans le système (3) donnent

$$\begin{aligned}
 -i_5 y + i_7 y - i_9 x + i_{11} x &= i_{13} u \\
 -i_6 y + i_8 y - i_{10} x + i_{12} x &= i_{14} u \\
 -i_6 y + i_5 y - i_{10} x + i_9 x + \varepsilon &= i_{15} v \\
 -i_8 y + i_7 y - i_{12} x + i_{11} x &= i_{16} v
 \end{aligned} \quad (8)$$

Éliminons maintenant i_1 , i_2 , i_3 et i_4 entre les systèmes (6) et (4), il vient

$$\begin{aligned}
 i_9 &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_5 \\
 i_{10} &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_6 \\
 i_{11} &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_7 \\
 i_{12} &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_8
 \end{aligned} \quad (9)$$

puis éliminons i_9 , i_{10} , i_{11} et i_{12} entre les systèmes (9) et (15), nous obtenons

$$\begin{aligned}
 i_{13} - i_{15} &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_5 \\
 i_{13} + i_{11} &= \left(1 + \frac{y}{x}\right) i_6 \\
 i_{13} + i_{16} &= -\left(1 + \frac{y}{x}\right) i_7 \\
 i_{14} - i_{16} &= -\left(1 + \frac{y}{x}\right) i_8
 \end{aligned}$$

ou encore

$$\begin{aligned}
 i_3 &= \frac{x}{x+y} i_{13} - \frac{x}{x+y} i_{15} \\
 i_6 &= \frac{x}{x+y} i_{13} + \frac{x}{x+y} i_{14} \\
 i_7 &= -\frac{x}{x+y} i_{13} - \frac{x}{x+y} i_{16} \\
 i_8 &= -\frac{x}{x+y} i_{14} + \frac{x}{x+y} i_{16}
 \end{aligned} \quad (10)$$

En substituant le système (9) dans le système (8), nous obtenons :

$$\begin{aligned}
 -(2yx + x^2) i_5 + (2yx + x^2) i_7 &= i_{13} ux \\
 -(2yx + x^2) i_6 + (2yx + x^2) i_8 &= i_{14} ux \\
 -(2yx + x^2) i_6 + (2yx + x^2) i_5 + \varepsilon x &= i_{15} vx \\
 -(2yx + x^2) i_8 + (2yx + x^2) i_7 &= i_{16} vx
 \end{aligned} \quad (11)$$

Puis substituons le système (10) dans le système (11). Il vient :

$$\begin{aligned}
 -2i_{13} + i_{15} - i_{16} &= \frac{x+y}{x^2+2xy} u i_{13} \\
 -2i_{14} - i_{15} + i_{16} &= \frac{x+y}{x^2+2xy} u i_{14} \\
 -2i_{15} - i_{14} + i_{13} &= \frac{x+y}{x^2+2xy} v i_{15} - \frac{x+y}{x^2+2xy} \varepsilon \\
 -2i_{16} + i_{14} - i_{13} &= \frac{x+y}{x^2+2xy} v i_{16}
 \end{aligned}$$

Posons

$$\frac{x+y}{x^2+2xy} = \omega \quad (12)$$

et ordonnons les équations par rapport aux indices des i . Nous obtenons

$$\begin{array}{rclcl}
 (2 + \omega u) i_{15} & - i_{15} & + i_{16} & = 0 \\
 & (2 + \omega u) i_{14} & + i_{15} & - i_{16} & = 0 \quad (I3) \\
 - i_{15} & + i_{14} & + (2 + \omega v) i_{15} & = \omega \varepsilon \\
 i_{15} & - i_{14} & + (2 + \omega v) i_{16} & = 0
 \end{array}$$

Des deux premières équations de ce système, on déduit :

$$\begin{aligned}
 i_{15} + i_{14} &= 0 \\
 i_{15} - i_{14} &= \frac{2(i_{15} - i_{16})}{2 + \omega u}
 \end{aligned}$$

d'où il résulte

$$i_{15} = -i_{14} = \frac{i_{15} - i_{16}}{2 + \omega u} \quad (I4)$$

et, par la substitution de ces deux valeurs, les deux dernières équations du système (I3) deviennent enfin :

$$\begin{aligned}
 (2 + \omega v) i_{15} &= \omega \varepsilon + \frac{2(i_{15} - i_{16})}{2 + \omega u} \\
 (2 + \omega v) i_{16} &= -\frac{2(i_{15} - i_{16})}{2 + \omega u}
 \end{aligned}$$

ou encore

$$\begin{aligned}
 \left[(2 + \omega v) - \frac{2}{2 + \omega u} \right] i_{15} + \frac{2}{2 + \omega u} i_{16} &= \omega \varepsilon \\
 \frac{2}{2 + \omega u} i_{15} + \left[(2 + \omega v) - \frac{2}{2 + \omega u} \right] i_{16} &= 0 \quad (I5)
 \end{aligned}$$

Posons, pour simplifier les écritures,

$$\begin{aligned}
 \frac{2}{2 + \omega u} &= B \\
 2 + \omega v - B &= A.
 \end{aligned} \quad (I6)$$

Les équations (15) deviennent

$$A i_{15} + B i_{16} = \omega \varepsilon \quad (17)$$

$$B i_{15} + A i_{16} = 0$$

qui donnent

$$i_{15} = \frac{A \omega \varepsilon}{A^2 - B^2} \quad (18)$$

$$i_{16} = \frac{-B \omega \varepsilon}{A^2 - B^2}$$

Nous obtenons ainsi la valeur de i_{16} que nous cherchions.

Dans le cas du circuit téléphonique direct, c'est-à-dire si l'on supprime les postes télégraphiques et le système anti-inducteur, on aura, naturellement, pour l'intensité du courant téléphonique

$$i = \frac{\varepsilon}{2u + 2v} \quad (19)$$

Il sera intéressant de comparer cette valeur avec la valeur de i_{16} donnée par la relation (18).

* * *

REMARQUES. — I. On voit, d'après la relation (14), que

$$i_{13} = -i_{14}$$

c'est-à-dire que les courants dans les deux fils de ligne sont à chaque instant égaux et de signes contraires.

II. Il en résulte que le système (10) donne

$$i_5 = -i_6$$

$$i_7 = -i_8$$

et le système (1) donne alors

$$i_1 = -i_2$$

$$i_3 = -i_4$$

c'est-à-dire que les courants dans les branches correspondantes 1 et 2, 3 et 4, 5 et 6, 7 et 8, sont deux à deux à chaque instant égaux et de signes contraires.

On pourrait donc, sans rien changer à la distribution des courants et des potentiels, supposer la terre supprimée, et les branches 1 et 2, 3 et 4, 5 et 6, 7 et 8, directement bouclées deux à deux : en d'autres termes, tout ce qui va en terre par un condensateur ou un gradateur (ou récepteur) d'une des stations télégraphiques rentre de la terre dans le réseau par les appareils correspondants (condensateur ou gradateur) du second poste de la même station. C'est-à-dire que, dans nos hypothèses, la terre intercalée entre les deux extrémités du circuit téléphonique ne joue aucun rôle.

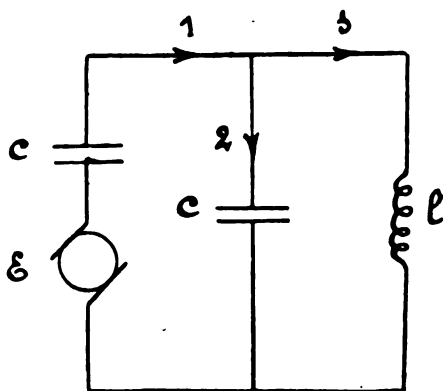


Fig. 3.

III. Considérons un réseau simplifié (fig. 3) sans résistances ohmiques : une première branche 1 comprend

une force électro-motrice sinusoïdale ε , et un condensateur de capacité c ; son impédance est donc $\frac{\sqrt{-1}}{p c}$, si $p = 2 \pi N$, N étant la fréquence; une seconde branche 2 ne comprend qu'un condensateur de capacité c ; son impédance est donc $\frac{\sqrt{-1}}{p c}$; une troisième branche 3 comprend un coefficient de self-induction l ; son impédance est donc $-\sqrt{-1} p l$.

En appliquant les lemmes de Kirchoff, on obtient

$$\begin{aligned} i_1 &= i_2 + i_3 \\ \frac{i_2}{p c} &= -i_3 p l \\ \varepsilon &= \frac{i_1}{p c} \sqrt{-1} + \frac{i_2}{p c} \sqrt{-1} \end{aligned}$$

On en déduit, tous calculs faits :

$$i_2 = -\varepsilon \frac{2 p c}{1 - \frac{2}{p^2 l c}} \sqrt{-1}$$

ou, si ε est, en notations ordinaires, égale à $E \sin p t$, la notation ordinaire de i_2 sera

$$i = -\frac{E 2 p c}{1 - \frac{2}{p^2 l c}} \cos p t.$$

Sa valeur maxima est

$$I = \frac{E 2 p c}{1 - \frac{2}{p^2 l c}}$$

On voit que la présence de la branche 3, comprenant le coefficient de self-induction l , a pour effet d'augmenter l'intensité du courant dans la branche à condensateur 2, du moment que l'on a $f_2 l c < 2$, donc pour les basses fréquences.

Or, aux basses fréquences, les coefficients de self-induction de postes téléphoniques (branche 15 et 16 du schéma fig. 2), qui sont faibles, jouent un rôle de minime importance. Nous nous rapprochons donc des conditions du schéma fig. 3. Nous pouvons ainsi nous attendre à ce que *pour les basses fréquences, l'intensité du courant reçu, à égalité de force électro-motrice appliquée, sera plus grande dans le cas du système Van Rysselberghe que si, tout en maintenant les condensateurs séparateurs des branches 15 et 16, on supprimerait les postes télégraphiques avec leurs accessoires anti-inducteurs.*

C'est donc à tort que l'on supposerait que les dérivations créées dans le circuit téléphonique par les postes télégraphiques anti-inductés et leurs terres ont pour effet de diminuer l'intensité du courant téléphonique reçu. C'est le contraire précisément qui se produit, surtout aux basses fréquences.

Ceci, soit dit en passant, montre à l'évidence le danger qu'il y a à raisonner sur des courants alternatifs comme on le fait sur des courants continus : en raisonnant ainsi à faux, on perd de vue un facteur essentiel des phénomènes alternatifs, l'angle de décalage. C'est à cause de cet angle de décalage que la loi de continuité du courant continu $\sum i = 0$ cesse d'être exacte quand on l'applique aux intensités moyennes ou maxima des courants alternatifs aboutissant à un même nœud.

* * *

Application numérique. — J'ai appliqué la formule n° 18 au cas d'une ligne double de 25 kilomètres de longueur,

en fil de bronze de 2^m/m de diamètre à 80 % de conductibilité. La résistance de chacun des fils de ligne est alors égale à $25 \times 6,4 \text{ ohms} = 160 \text{ ohms}$ environ.

Les impédances des diverses branches du réseau sont alors

$$x = 500 - 10 p \sqrt{-1}$$

$$y = \frac{10^6}{2 p} \sqrt{-1}$$

$$u = 160$$

$$v = 450 + \left(\frac{10^6}{0,25 p} - 0,7 p \right) \sqrt{-1}$$

J'ai calculé i_{16} pour les fréquences $N = 100, 120, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 700, 900$ et $1,000$, comprenant à peu près toute l'échelle de la voix humaine, depuis la fondamentale de la voix de basse-taille jusqu'à la note la plus aiguë du soprano.

J'ai calculé aussi i dans le cas où les postes télégraphiques et leurs accessoires anti-inducteurs sont supprimés, soit que l'on maintienne ou que l'on supprime les condensateurs séparateurs intercalés dans les branches 15 et 16.

A titre d'exemple je donne ci-dessus le calcul de i_{16} et du décalage de ce courant dans le cas de $N = 550$.

Les calculs ont été effectués, en majeure partie, au moyen de la règle logarithmique de 25 centimètres : c'est dire qu'ils ne sont qu'approximatifs.

Calcul de i_{16} dans le cas de $N = 550$.

$$N = 550$$

$$p = 3455$$

$$\begin{aligned}
 x &= 500 - 10 p \sqrt{-1} = 500 - 34550 \sqrt{-1} \\
 y &= \frac{10^6}{2 p} \sqrt{-1} = 144.8 \sqrt{-1} \\
 u &= 160 \\
 v &= 450 + \left(\frac{10^6}{0.25 p} - 0.7 p \right) \sqrt{-1} = 450 - 1261.6 \sqrt{-1} \\
 x^2 &= 10^6 \left(-1190 - 34.55 \sqrt{-1} \right) \\
 2xy &= 10^6 \left(10 + 0.1448 \sqrt{-1} \right) \\
 x^2 + 2xy &= 10^6 \left(-1180 - 34.405 \sqrt{-1} \right) \\
 \frac{1}{x^2 + 2xy} &= 10^{-6} \left(\frac{-1180 + 34.405 \sqrt{-1}}{1396180} \right) \\
 x + y &= 500 - 34405 \sqrt{-1} \\
 \omega = \frac{x + y}{x^2 + 2xy} &= 10^{-6} \left(0.423 + 29.12 \sqrt{-1} \right) \\
 \omega u &= 10^{-4} \left(0.677 + 46.6 \sqrt{-1} \right) \\
 1 + \frac{\omega u}{2} &= 1 + 0.0023 \sqrt{-1} \\
 B = \frac{1}{1 + \frac{\omega u}{2}} &= 1 - 0.0023 \sqrt{-1} \\
 \omega v &= 0.03694 + 0.01256 \sqrt{-1} \\
 A = 2 + \omega v - B &= 1.03694 + 0.01486 \sqrt{-1} \\
 A^2 &= 1.07515 + 0.0308 \sqrt{-1} \\
 B^2 &= 1 - 0.0046 \sqrt{-1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A^2 - B^2 &= 0.07515 + 0.0354 \sqrt{-1} \\
\frac{I}{A^2 - B^2} &= 10.9 - 5.135 \sqrt{-1} \\
10^6 B \omega &= 0.490 + 29.12 \sqrt{-1} \\
-10^6 \frac{\beta \omega}{A^2 - B^2} = m - n \sqrt{-1} &= -154.5 - 315 \sqrt{-1} \\
t y \varphi &= \frac{n}{m} = -2.04 \\
\text{Décalage} = \varphi &= -64^{\circ}55' \\
10^6 I = \sqrt{m^2 + n^2} &= 350.5
\end{aligned}$$

Tel est le décalage du courant par rapport à la force électromotrice ; quant à I , c'est l'intensité maxima (ou moyenne) du courant i_{16} , en *micro-ampères*, pour une force électromotrice sinusoïdale appliquée maxima (ou moyenne) de un volt.

Comme on le voit, les calculs sont assez longs et pénibles.

J'ai réuni dans les tableaux ci-dessous les valeurs des courants i_{16} , en *micro-ampères* et de leur décalage, pour une force électromotrice appliquée de 1 volt :

1° Dans le cas du système Van Rysselberghe.

2° Dans le cas où l'on a supprimé les postes télégraphiques et leurs accessoires, tout en maintenant les condensateurs séparateurs de $\frac{1}{2}$ microforad dans les branches téléphoniques 15 et 16.

3° Dans le cas où l'on a de plus supprimé ces condensateurs séparateurs ; c'est-à-dire dans l'hypothèse du circuit purement téléphonique direct.

Le signe + dans les angles de décalage indique un décalage *en avance* ; le signe — un décalage *en arrière*.

* * *

Intensité en micro-ampères et décalage par rapport à la force électromotrice appliquée égale à 1 volt, du courant téléphonique reçu.

FRÉ- QUENCE N.	CAS DU SYSTÈME VAN RYSELBERGHE.		CIRCUIT PUREMENT TÉLÉPHONIQUE.			
			AVEC SÉPARATEUR.		SANS SÉPARATEURS.	
	INTENSITÉ.	DÉCALAGE.	INTENSITÉ.	DÉCALAGE.	INTENSITÉ.	DÉCALAGE.
100	178.5	98°30'	83.4	84°10'	66.4	— 35°5'
120	162	90°45'				
150	170	83°25'	126.5	80°20'	556	— 47°55'
200	229	77°05'	208.0	75°20'	467	— 55°
250	344	69°00	344	67°05'	398	— 61°
300	500	53°05'	495	53°05'	346	— 65°5'
350	709	24°25'	709	24°25'	303	— 68°25'
400	730	— 15°35'	730	— 15°35'	268	— 70°55'
450	600	— 42°45'	600	— 42°45'	241	— 72°50'
500	450	— 56°40'	450	— 56°40'	219	— 74°45'
550	358	— 64°10'	358	— 64°10'	201	— 75°05'
700	222	— 74°20'	222	— 74°20'	160	— 78°05'
900	150	— 79°20'	150	— 79°20'	125	— 81°
1000	132	— 80°45'	132	— 80°45'	112.5	— 82°5'

C'est au moyen de ces tableaux qu'ont été construits les diagrammes (fig. 4).

On en déduit plusieurs conséquences intéressantes :

1° Comme on devait s'y attendre, un décalage nul correspond à un maximum d'intensité ; un décalage de 90° correspond à un minimum d'intensité :

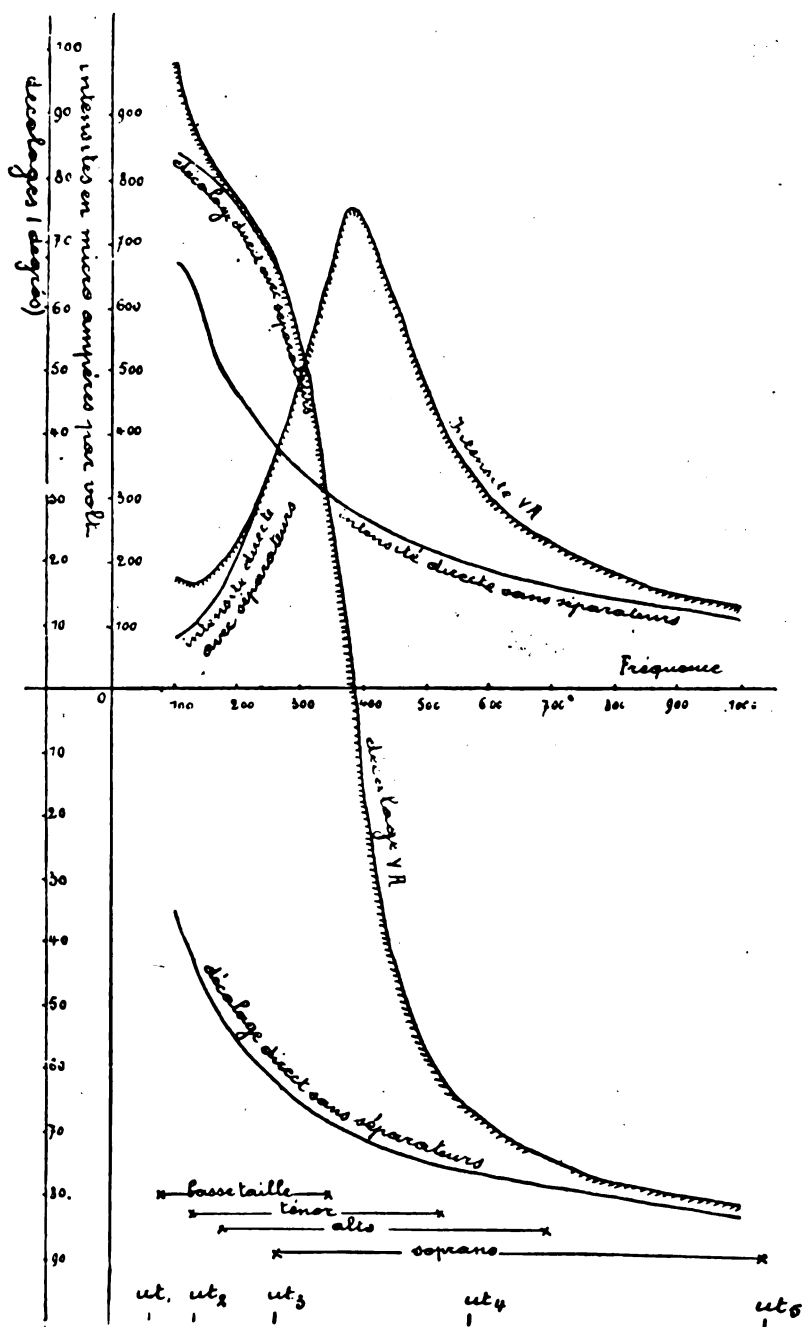


Fig. 4.

2° En dessous de la fréquence 350 (fa_3 environ), la self-induction des postes télégraphiques amène une augmentation de l'intensité du courant téléphonique reçu, par rapport à la valeur de cette intensité dans le cas du circuit purement téléphonique avec séparateurs. Cette augmentation est d'autant plus marquée que la fréquence est plus faible, dans les limites des diagrammes ;

3° A mesure que la fréquence augmente, l'intensité, dans les deux premiers cas, se rapproche de plus en plus de celle qui correspond au circuit purement téléphonique, sans séparateurs ; mais elle reste supérieure à cette dernière dans les limites des diagrammes. Elle ne lui est inférieure que pour les fréquences plus faibles que 270 environ (ut dièze₃) ;

4° Le réseau avec séparateurs (que les postes télégraphiques avec leurs accessoires anti-inducteurs soient ou non supprimés) a une fréquence propre nettement caractérisée ; elle est voisine de 380 (intermédiaire entre fa dièze₃ et sol_3). Cette fréquence correspond à une augmentation extrêmement marquée de l'intensité du courant reçu. Il y a alors résonnance.

* * *

CONCLUSION. — Je crois pouvoir déduire de cette analyse que l'emploi du système Van Rysselberghe est, au point de vue de l'intensité du courant téléphonique reçu, beaucoup plus avantageux que l'emploi du circuit purement téléphonique (sans séparateurs), pour les fréquences supérieures à 270 (ut dièze₃), donc pour les voix de femmes en général ; il est surtout favorable aux environs de la fréquence 380 (sol_3). Mais il est nettement inférieur au circuit purement téléphonique (sans sépara-

teurs) pour les voix de basse-taille et pour les notes inférieures de la voix de ténor, donc en général pour les voix d'hommes.

Sauf pour les fréquences inférieures à fa_3 , le circuit Van Rysselberghe est pratiquement identique au circuit purement téléphonique avec séparateurs, c'est-à-dire qu'au delà de fa_3 , les postes télégraphiques et leurs accessoires ne jouent plus aucun rôle appréciable.

Les décalages varient beaucoup plus rapidement avec la fréquence dans le cas de l'emploi des séparateurs que dans le cas du circuit purement téléphonique, sans séparateurs, ce qui joue probablement un rôle plutôt défavorable dans le cas du système Van Rysselberghe.

(Applaudissements.)

La séance est levée à midi et demi.

SÉANCE DU 30 OCTOBRE 1898.



M. De Bast, vice-président, au fauteuil.



ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DES MEMBRES EFFECTIFS.

Le seul article à l'ordre du jour est l'élection du Secrétaire-général et du Trésorier pour la période 1898-1901, de quatre vice-présidents et de neuf commissaires pour l'année sociale novembre 1898 à octobre 1899 inclus.

Preennent part au vote: MM. André, Bède, Bourquin, Briffaux, Chantraine, Colard, Coops-Busgers, Dawson, De Bast, Della Giusta, Della Riccia, Del Proposto, de Ryckere, de Sauteiron, Dewandre, Dubois, du Welz, Feron, Goldschmidt, Henrion A., Henrion M., Ilkoff, Javal, Kroll, L'Hoest, Libert, Linder, Maternowski, Mathieu, Maus, Mélotte, Minsier, Moens, Nobili, Peltzer, Pirard A., Quinaux, Segre E., See, Theunis, Turchi, Van der Hecht, Van der Wallen, Van Vloten, Verdeleanu, Ver Eecke.

Sont élus :

Vice-présidents, MM. Dawson, Del Proposto, Henrard et Mélotte ;

Secrétaire-général, M. L'Hoest ;

Trésorier, M. Larmoyer ;

Commissaires, MM. André, Bayet, Briffaux, Colard, de Waal, Francken, Kniphorst, Mavroïdis et Pierard.

MÉMOIRE.



D'assez nombreuses questions d'application exigent la résolution d'équations du 3^e degré.

La recherche des racines par le calcul est souvent ardue ; l'emploi de la règle à calcul, signalé pour la première fois par Bour, peut être particulièrement avantageux lorsque ces équations se présentent en série. M. Cloeren, qui a eu l'occasion de traiter de nombreuses questions de l'espèce, a apporté à la méthode de Bour d'heureux perfectionnements. On les trouvera dans le présent mémoire qui, en même temps, donne une théorie complète de la question avec de nombreux exemples. Il sera consulté avec le plus grand profit par tous ceux qui auraient à résoudre les mêmes difficultés que M. Cloeren a surmontées.

Méthode Cloeren-Bour pour la résolution générale des équations du 3^e degré au moyen de la règle à calcul.

INTRODUCTION.

A la suite d'un travail sur les tensions des fils téléphoniques et télégraphiques, j'ai été amené, pour le calcul des tableaux, à résoudre une équation du 3^{me} degré de la forme

$$(1) \quad x^3 \pm Px^2 \pm Q = 0,$$

x représentant la tension cherchée d'un fil élastique à une température donnée, P et Q des valeurs numériques renfermant comme variable cette température. (*)

(*) Conditions d'équilibre d'un fil de bronze phosphoreux tendu entre deux appuis, *Bulletin de la Société Belge d'Electriciens*, janvier 1888.

Le calcul des équations du 3^{me} degré étant toujours, quelque méthode qu'on y apporte, chose longue et pénible, mon attention a été appelée sur un procédé basé sur l'emploi de la règle à calcul et imaginé par M. E. Bour.

Les principes de cette méthode qui a paru pour la première fois dans les *Comptes rendus de l'Académie* (*), ont été publiés par M. G. Montefiore Levi dans sa traduction du traité sur la règle à calcul de M. Quintino Sella. (**)

La méthode de M. Bour s'applique à la forme spéciale de l'équation,

$$x^3 \pm Px \pm Q = 0,$$

qu'on transforme en

$$y^3 \mp y^2 = A.$$

Il m'a paru intéressant d'étudier le procédé ingénieux de M. Bour et de montrer qu'il est directement applicable à l'équation (1) sans transformation préalable.

Le désir de sauver la belle découverte de l'éminent mathématicien français d'un oubli injuste et de la rendre, par quelques modifications y apportées, familière à tous ceux qui auront à s'occuper de la résolution des équations du 3^e degré, est d'autant plus justifié que ces équations se présentent dans quelques applications importantes de l'électricité, comme par exemple, dans le calcul des transformateurs et dans l'installation des réseaux téléphoniques.

Comme la méthode est basée sur l'extraction de la

(*) Résolution des équations du 3^{me} degré au moyen de la règle à calcul, par M. E. BOUR. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 44, 1^{er} semestre 1857, page 22.

(**) Théorie et pratique de la règle à calcul par QUINTINO SELLA, traduit de l'italien par G. MONTEFIORE LEVI, Paris et Liège, Noblet et Baudry, 1863.

racine cubique et que le procédé que je propose diffère un peu de ceux indiqués dans les traités sur la règle à calcul, il convient d'entrer dans quelques détails concernant cet instrument.

La règle à calcul se compose de quatre échelles logarithmiques (fig. 1) dont seulement trois servent à notre but, savoir :

1. L'échelle supérieure (S) de la partie fixe de l'instrument (fig. 1),
2. L'échelle supérieure (T) du tiroir, laquelle se trouve en contact avec la précédente ,
3. L'échelle inférieure (I) de la partie fixe.

L'échelle S est formée de deux parties apparemment identiques, portant les nombres 1, 2, 3 .., 10 jusqu'au milieu, et les mêmes nombres à partir du milieu jusqu'au bout.

L'échelle T est identiquement la même que la précédente.

Les nombres de l'échelle I forment une échelle consécutive de 1 jusqu'à 10 (fig. 1).

Voici le principe sur lequel est basée la division des échelles.

En appelant L la longueur de la moitié de l'échelle supérieure, une longueur quelconque l , comprise entre l'origine A et une division n est égale à

$$l = L \log n. \text{ (fig. 2)}$$

En lisant la même division n sur la seconde moitié de S, la longueur comprise entre le milieu B et n est également

$$l = L \log n.$$

Mais en comptant toute la longueur comprise entre l'origine et le nombre n de la seconde moitié de l'échelle, on a

$$L + l$$

et puisqu'on peut écrire $L = L \log 10$, on a la somme

$$L + l = L \log 10 + L \log n = L \log 10 n.$$

D'après ceci, les nombres marqués sur la seconde moitié de S ont, par rapport à l'origine A, des valeurs dix fois plus grandes qu'ils n'indiquent. Il faut donc leur attribuer les valeurs 10, 20, 30, ... 100, de sorte que l'échelle S constitue d'un bout de l'instrument à l'autre une échelle consécutive de 1 jusqu'à 100 (fig. 3), et ce sont *ces valeurs auxquelles nous aurons affaire dans tout ce qui va suivre.*

Les mêmes considérations s'appliquent à l'échelle T du tiroir.

Les divisions de l'échelle inférieure I sont calculées sur une autre base :

Une longueur quelconque l'' (fig. 2), comprise entre l'origine E et une division m s'exprime en fonction de la longueur L par le rapport

$$l'' = 2 L \log m.$$

Cela posé, l'opération fondamentale qu'on peut effectuer avec la règle, savoir la multiplication, s'explique sans difficulté.

Pour multiplier un nombre n par p , on place l'origine D (*) du tiroir sur le nombre n , lu sur l'échelle S, et on lit la division r qui, sur l'échelle S, se trouve en coïncidence avec le nombre p du tiroir fig. 4.

Car la longueur A $r = l + l'$

(*) On est convenu de désigner, pour plus de facilité, les bouts extrêmes des échelles par « *origine* » et « *extrême* ».

ou

$$L \log r = L \log n + L \log p ;$$

$$\log r = \log n + \log p = \log np,$$

ou enfin

$$r = np.$$

On remarquera que dans les opérations la notation des longueurs disparaît et que les chiffres lus sur les échelles gardent le caractère de nombres abstraits.

En marquant (fig. 5) un nombre n sur l'échelle I et en plaçant l'origine T du tiroir en regard, le nombre t sur l'échelle S coïncidant avec p sur l'échelle du tiroir, n'exprime plus le produit des nombres p et n , mais le produit $p n^2$, car

$$l = l' + l'',$$

ou

$$L \log t = L \log p + 2 L \log n ;$$

$$\log t = \log p + \log n^2$$

$$t = p n^2 ;$$

lorsque $p = n$, on a

$$t = n^3.$$

La recherche du cube d'un nombre étant démontrée, l'opération inverse pour l'extraction de la racine cubique est aisée en principe. On marque le cube t sur l'échelle S et on cherche par l'origine du tiroir sur l'échelle I un nombre n tel que la division t se trouve en coïncidence avec le même nombre n sur le tiroir.

Comme il a été dit plus haut (page 520), l'échelle S ne comprend que la série des nombres de 1 jusqu'à 100, l'échelle I celle de 1 à 10.

Ayant donc à calculer la racine $x = \sqrt[5]{R}$, en d'autres

termes, ayant à résoudre l'équation $x^3 = R$, il faut que cette équation, pour pouvoir être résolue au moyen de la règle, satisfasse aux deux conditions

$$\begin{aligned} 10 &> x > 1 \\ 100 &> R > 1. \end{aligned}$$

Prenons un exemple numérique.

Exemple 1. $x^3 = 79$.

En écrivant l'équation sous la forme $x^3 \cdot x = 79$ et en attribuant à x successivement les valeurs 1, 10, 100, etc., respectivement 0,1, 0,01, etc., on voit de suite que la première condition $10 > x > 1$ est remplie; la seconde l'étant aussi, $100 > 79 > 1$, on marque au moyen du curseur 79 sur l'échelle S et en faisant glisser l'origine du tiroir le long de l'échelle I, on y cherche un nombre tel que la division marquée 79 se trouve en regard du même nombre sur l'échelle T; ce nombre sera $x = 4,29$ (fig. 6).

Exemple 2. $x^3 \cdot x = 0,027$.

On voit que la première condition n'est pas remplie, car on a

$$1 > x > 0,1;$$

substituons à x une autre valeur x' , telle que

$$10 > x' > 1.$$

La comparaison de ces deux inégalités fait voir qu'il faut poser

$$x = 0,1 x'.$$

Cette valeur substituée dans l'équation proposée, donne

$$(0,1 x')^3 \cdot 0,1 x' = 0,027$$

ou

$$x^{12} \cdot x' = 27.$$

Maintenant les deux conditions étant remplies, on marque 27 sur S et, en cherchant par l'origine du tiroir, on trouve $x' = 3$, d'où $x = 0,3$ (fig. 7).

Exemple 3. $x^2 \cdot x = 425$.

La première condition $10 > x > 1$ est remplie, mais la seconde ne l'est pas. On peut la remplir en divisant les deux membres de l'équation par 10.

$$x^2 \cdot \frac{1}{10} x = 42,5.$$

Marquons 42,5 sur S, supposons le problème résolu et soit x sur l'échelle I la racine cherchée.

Le coefficient 0,1 qui multiplie le nombre x qu'on veut lire sur l'échelle T, indique que les nombres de cette échelle ne peuvent plus avoir leurs valeurs ordinaires.

Il faut se rappeler ici que les opérations de la règle à calcul sont purement mécaniques, à tel point que les résultats dans les calculs simples, comme la multiplication par exemple, ne font plus penser à ce que signifient les opérations en réalité, savoir l'addition de deux longueurs. Le résultat doit se présenter à l'œil sans qu'un travail intellectuel soit nécessaire. C'est la méthode graphique des logarithmes. Il est, à plus forte raison, nécessaire dans les calculs plus compliqués, de garder à l'instrument cette qualité et de l'arranger, s'il le faut, préalablement de façon à être dispensé de suivre dans l'esprit les opérations, et à pouvoir confier à l'œil et à la main la besogne qu'on doit faire mentalement dans les méthodes ordinaires du calcul.

Une difficulté qui se présente notamment dans l'extrac-

tion de la racine cubique consiste dans la détermination du premier chiffre significatif de la racine et l'instrument pourrait donner des résultats erronés, si on ne le préparait d'avance de façon à être à l'abri de ces erreurs, comme l'exemple choisi le fera voir.

Reprenons l'équation $x^3 \cdot \frac{1}{10} x = 42,5$, qui n'est autre chose que l'équation proposée, arrangée convenablement pour remplir les deux conditions.

En faisant glisser l'origine du tiroir le long de l'échelle I jusqu'à ce qu'on trouve un nombre tel que la division marquée 42,5 soit en coïncidence avec un nombre égal de l'échelle T, on trouverait 3,49. C'est la racine de l'équation $x^3 \cdot x = 42,5$, mais non pas celle de l'équation $x^3 \cdot \frac{1}{10} x = 42,5$.

Pour peu qu'on y réfléchisse, on trouve que la différence entre le résultat cherché et le résultat fourni par l'instrument provient de ce qu'on n'a pas mis en accord l'instrument avec la question.

L'instrument, d'après la valeur des nombres de ses échelles, donne bien exactement $x^3 \cdot x = 3,49^3 \cdot 3,49 = 42,5$, tandis qu'en portant la valeur 3,49 dans l'équation $x^3 \cdot \frac{1}{10} x$ on a $3,49^3 \cdot 0,349$, ce qui n'est pas égal à 42,5.

Un petit arrangement préalable de l'échelle T fait disparaître cette incertitude.

Supposons le problème résolu, soit x sur l'échelle I la racine exacte et voyons quel est le chiffre z sur T qui se trouve en coïncidence avec 42,5, de façon à réaliser l'équation $x^3 \cdot z = 42,5$.

Sans regarder l'instrument, on sait que si les deux équations

$$x^3 \cdot \frac{1}{10} x = 42,5$$

et

$$x^3 \cdot z = 42,5$$

doivent être identiques, il faut que

$$\frac{1}{10} x = z \text{ ou } x = 10 z.$$

De la dernière équation on conclut que, pour lire le nombre x sur T, on doit attribuer au nombre z une valeur 10 fois plus grande qu'elle n'est indiquée sur l'échelle et que, par conséquent, pour résoudre le problème par le tâtonnement connu, il faut attribuer à tous les nombres de l'échelle T des valeurs dix fois plus grandes.

La modification à apporter à l'instrument consiste donc à changer convenablement les nombres de l'échelle du tiroir, à former comme on dit, une *échelle fictive*.

C'est l'équation $x = 10 z$ qui donne la clef pour cette modification.

Ainsi au lieu de l'échelle T ordinaire

$$1, 2, 3, \dots, 10, 20, 30, \dots, 100,$$

on a l'échelle fictive

$$10, 20, 30, \dots, 100, 200, 300, \dots, 1\ 000 \text{ (fig. 8)}$$

Si avec cette échelle fictive on veut chercher la racine sur I, on voit de suite que cela n'est pas possible, car en avançant le tiroir vers la droite, la division marquée 42,5 ne peut jamais venir en coïncidence avec une division de l'échelle fictive qui soit plus petite que 10, valeur fictive de l'origine.

En général, la recherche au moyen de l'origine du tiroir sera impossible aussi souvent que sa valeur fictive est plus

grande que le nombre m de l'échelle I qui se trouve en regard du cube et qui est marqué par le curseur.

Dans ces cas on se sert de l'extrême du tiroir.

Ceci demande une explication.

Supposons un problème $x^3 = R$ résolu par cette position du tiroir, soit x sur l'échelle I la racine cherchée et z le nombre lu sur l'échelle T ordinaire (fig.9).

Alors on a

$$l = l'' - l';$$

$$l = L \log R$$

$$l'' = 2 L \log x$$

$$l' = 2 L - L \log z = 2 L \log 10 - L \log z.$$

Donc,

$$L \log R = 2 L \log x - 2 L \log 10 + L \log z.$$

$$\log R = 2 \log x - 2 \log 10 + \log z,$$

ou enfin

$$R = x^2 \cdot \frac{z}{100}.$$

Cette formule montre que *dans le cas où l'on opère au moyen de l'extrême du tiroir, il faut attribuer aux nombres de l'échelle T la centième partie de la valeur indiquée.*

Reprenons maintenant l'exemple 3, et récapitulons :

$$x^2 \cdot x = 425.$$

La première condition $10 > x > 1$ est remplie, la seconde ne l'est pas.

Pour la remplir divisons par 10, il vient

$$x^2 \cdot \frac{1}{10} x = 42,5.$$

Posant $\frac{1}{10}x = z$, on a $x = 10z$; cela veut dire : les nombres du tiroir sont à multiplier par 10.

Voyant qu'alors on ne peut pas opérer par l'origine (dont la valeur fictive = 10) on prend l'extrême.

Dans ce cas tous les nombres de l'échelle T sont à diviser par 100; mais en vertu de l'équation $x = 10z$, il faut les multiplier aussi par 10, de sorte que le changement définitif que doit subir l'échelle T consiste en une division par 10, ce qui donne l'échelle fictive :

$$0,1, 0,2, 0,3, \dots, 1, 2, 3, \dots, 10.$$

Faisant alors le tâtonnement, on trouve $x = 7,52$ sur l'échelle I. Sur l'échelle T on lit 75,2, mais par les deux opérations effectuées, ce nombre a pris la valeur fictive $\frac{75,2}{100} \cdot 10 = 7,52$ (fig. 10).

Quelques exemples numériques serviront à s'habituer à la méthode.

Exemple 4. $x^3 \cdot x = 4250. \quad (1)$

On voit que

$$100 > x > 10,$$

il faut que

$$10 > x' > 1.$$

De ces deux inégalités suit qu'il faut poser

$$x = 10 x'.$$

Substituant cette valeur dans l'équation (1), il vient

$$(10 x')^3 \cdot 10 x' = 4250$$

ou

$$x'^4 \cdot x' = 4,25.$$

Les deux conditions sont réalisées et x n'étant pas affecté de coefficient, il n'y a pas d'échelle fictive à former.

On marque 4,25 sur S et par l'origine du tiroir on trouve

$$x' = 1,62, \text{ d'où } x = 16,2 \text{ (fig. 11).}$$

Exemple 5. $x^2 \cdot x = 42500$.

On voit que

$$100 > x > 10,$$

il faut que

$$10 > x' > 1, \text{ donc } x = 10 x'$$

$$(10 x')^2 \cdot 10 x' = 42500$$

$$x'^2 \cdot x' = 42,5.$$

Les deux conditions sont remplies. Au moyen de l'origine du tiroir on trouve $x' = 3,49$ (fig. 12), d'où

$$x = 34,9.$$

Exemple 6. $x^2 \cdot x = 425000$.

On voit que $100 > x > 10$;

il faut que $10 > x' > 1$; on pose $x = 10 x'$.

$$x'^2 \cdot x' = 425.$$

La première condition est remplie, mais non la seconde.

En divisant les deux membres par 10, il vient

$$x'^2 \cdot \frac{1}{10} x' = 42,5.$$

On pose $\frac{1}{10} x' = z$, d'où $x' = 10 z$.

Les nombres du tiroir doivent donc être multipliés par 10.

L'origine prenant la valeur fictive 10, il faut opérer par l'extrême et, par suite, diviser les nombres du tiroir par 100.

Des deux opérations, il suit qu'il faut les diviser par 10 pour avoir l'échelle fictive. On trouve $x' = 7,52$ (fig. 13), d'où

$$x = 75,2.$$

Exemple 7. $x^2 \cdot x = 4250000.$

On voit que $1000 > x > 100$
il faut que $10 > x' > 1$, d'où $x = 100 x'$

$$x'^2 \cdot x' = 4,25.$$

On trouve $x' = 1,62$ (voir fig. 11), d'où $x = 162.$

Exemple 8. $x^2 \cdot x = 0,425.$

On voit que $1 > x > 0,1$;
il faut que $10 > x' > 1$, d'où $x = \frac{1}{10} x'.$

$$x'^2 \cdot x' = 425.$$

La seconde condition n'étant pas remplie, on divisera par 10; il vient $x'^2 \cdot \frac{1}{10} x' = 42,5.$

On pose $\frac{1}{10} x' = z$, d'où $x' = 10 z.$

L'échelle du tiroir, multipliée par 10 aura pour origine fictive la valeur 10; il faut donc se servir de l'extrême et diviser par 100; comme il faut multiplier aussi par 10, une seule division par 10 fournit l'échelle fictive

On trouve $x' = 7,52$, (fig. 13),
donc

$$x = 0,752$$

Exemple 9. $x^2 \cdot x = 0,0425$.

On voit que $1 > x > 0,1$,
il faut que $10 > x' > 1$, d'où $x = 0,1 x'$

$$x'^2 \cdot x' = 42,5.$$

Les deux conditions sont remplies, et par l'origine on trouve

$$x' = 3,49,$$

d'où

$$x = 0,349.$$

Exemple 10. $x^2 \cdot x = 0,00425$.

$$1 > x > 0,1$$

$$10 > x' > 1; \quad x = 0,1 x'$$

$$x'^2 \cdot x' = 4,25.$$

On trouve par l'origine $x' = 1,62$,
d'où

$$x = 0,162.$$

Exemple 11. $x^2 \cdot x = 0,000425$

$$0,1 > x > 0,01$$

$$10 > x' > 1,$$

d'où

$$x = 0,01 x'$$

$$x'^2 \cdot x' = 425$$

$$x'^2 \cdot \frac{1}{10} x' = 42,5$$

$$\frac{1}{10} x' = z,$$

d'où

$$x' = 10 z.$$

L'échelle T sera à multiplier par 10. On voit qu'il faut se servir de l'extrême et, par conséquent, diviser par 100.

Divisant par 100 et multipliant par 10, on obtient l'échelle fictive, en divisant simplement par 10.

On trouve

$$x' = 7,52,$$

d'où

$$x = 0,0752.$$

* * *

PREMIÈRE PARTIE.

Les exemples précédents suffiront pour expliquer la méthode de la résolution des équations du 3^e degré.

L'équation du 3^e degré se présente généralement sous une des trois formes :

$$(1) \quad x^3 + Px^2 + Qx + R = 0,$$

$$(2) \quad x^3 + Px^2 + R = 0,$$

$$(3) \quad x^3 + Px + Q = 0.$$

La forme (1) est peut-être la forme la plus ordinaire sous laquelle un problème se présente, par exemple dans le calcul des transformateurs électriques.

La forme (2) se rencontre dans des problèmes de l'hydrostatique, de l'aérostatique et dans le calcul de la tension d'un fil élastique aux diverses températures.

La forme (3) est l'équation connue, à laquelle il faut ramener les autres formes pour appliquer la formule de Cardan dans la méthode ordinaire de résolution.

Nous allons d'abord considérer la forme (3), puisque c'est de cette équation que part M. Bour et qu'il transforme en

$$(4) \quad y^3 \mp y^2 = A$$

en posant

$$x = -\frac{Q}{py}$$

et

$$A = \frac{Q^2}{p^3}.$$

De la racine y trouvée au moyen de la règle à calcul, M. Bour déduit la racine de la proposée par la formule

$$(5) \quad x = -\frac{Q}{py}.$$

En écrivant l'équation (4) sous la forme

$$y^2(y \mp 1) = A,$$

l'analogie qui existe entre cette équation et celles qui nous ont servi à calculer la racine cubique ($x^3 \cdot x = R$), est évidente. Pour fixer les idées, prenons le cas

$$(6) \quad y^2(y - 1) = A,$$

correspondant à l'équation $x^3 + Px + Q = 0$.

Supposons que le nombre A soit marqué sur l'échelle S et qu'un nombre y sur l'échelle I soit la racine de l'équation (6), il est évident, d'après la théorie de l'instrument, que le nombre z de l'échelle du tiroir satisfait à l'équation

$$(7) \quad y^2 \cdot z = A. \text{ (fig. 14),}$$

Des équations (6) et (7), il suit que $y - 1 = z$, d'où $y = z + 1$. (8)

Le problème est donc ramené à celui de l'extraction de la racine cubique au moyen d'une échelle fictive.

En effet, si sur l'échelle I je veux trouver y par le

tâtonnement connu, il faut que je trouve sur l'échelle T également un nombre y et l'équation (8) m'apprend que je puis lire cette valeur en augmentant d'une unité la valeur de z et, en général, de tous les nombres de l'échelle.

Il va sans dire que pour résoudre l'équation $y^2(y-1)=A$, il faut que y et A soient dans les mêmes conditions que x et R à la page 5 et que, si ces conditions n'existent pas dans la proposée, on l'arrangera convenablement par les mêmes moyens que dans les exemples (1) à (11).

Exemple 12. — Soit $y^2(y-1) = 48$.

En attribuant à y successivement les valeurs 1, 10, etc., respectivement 0,1, 0,01, etc., on trouve sans difficulté que $10 > y > 1$, ce qui satisfait à la première condition. Et puisque $100 > 48 > 1$, la seconde condition est également remplie. On marque 48 sur S, on pose

$$y - 1 = z, \text{ d'où } y = z + 1,$$

c'est-à-dire, on forme l'échelle fictive en ajoutant 1 à tous les nombres de l'échelle T, puis en procédant par tâtonnement, on trouve

$$y = 4. \quad (\text{fig. 15}).$$

Avant de calculer la racine x de l'équation $x^5 + Px + R = 0$, nous allons résoudre quelques équations données de la forme (4).

Exemple 13. $y^2(y+1) = 48$.

On voit que $10 > y > 1$
et $100 > 48 > 1$.

On marque 48 sur S, on pose $y + 1 = z$, d'où $y = z - 1$.

L'échelle fictive s'obtient, dans ce cas, en retranchant 1 de tous les nombres du tiroir. On trouve $y = 3,32$. fig. 16).

Exemple 14. $y^2 (y - 1) = 525.$

On voit que $10 > y > 1$. La première condition est remplie, mais la seconde ne l'est pas.

En divisant les deux membres par 10, il vient

$$y^2 \cdot \frac{1}{10} (y - 1) = 52,5.$$

On marque 52,5 sur S et on pose

$$\frac{1}{10} (y - 1) = z, \quad \text{d'où} \quad y = 10z + 1. \quad (9)$$

La dernière équation signifie qu'il faut multiplier par 10 tous les nombres de l'échelle T et y ajouter encore 1, ce qui donne

au lieu de l'échelle 1, 2, 3, . . . 10, 20, 30, . . . 100, cette autre 11, 21, 31, . . . 101, 201, 301, . . . 1001.

L'origine a la valeur fictive 11, et pour la même raison indiquée p. 525, on est obligé d'opérer par l'extrême.

Dans ce cas, il faut d'abord diviser tous les nombres du tiroir par 100, puis, en vertu de l'équation (9), on les multipliera par 10 et finalement on ajoute 1, ce qui donne l'échelle fictive de la figure 17, au moyen de laquelle on trouve

$$y = 8,415.$$

Exemple 15. $y^2 (y - 1) = 2575.$

On voit que $100 > y > 10$;

il faut que $10 > y' > 1$ d'où $y = 10y'$.

Substituant cette valeur dans l'équation proposée, il vient

$$(10y')^2 (10y' - 1) = 2575,$$

ou

$$y'^2 (y' - 0,1) = 2,575.$$

Les deux conditions étant remplies, on marque 2,575 sur S et on pose $y' - 0,1 = z$, d'où $y' = z + 0,1$.

L'échelle fictive se forme en ajoutant 0,1 à tous les nombres du tiroir, ce qui donne l'échelle

$$1,1, \quad 2,1, \quad 3,1, \quad \dots \quad 10,1, \quad 20,1, \quad \dots \quad 100,1.$$

La valeur des subdivisions n'est pas difficile à reconnaître. On trouve $y' = 1,405$ (fig. 18), et puisque $y = 10y'$, la racine est

$$y = 14,05.$$

Exemple 16. $y^2(y - 1) = 0,000\,485$.

On voit que $10 > y > 1$.

On remplira la seconde condition en multipliant les deux membres par 10 000, il vient

$$y^2 \cdot 10\,000(y - 1) = 4,85.$$

Après avoir marqué 4,85 sur S, on pose

$$10\,000(y - 1) = z, \quad \text{d'où } y = \frac{z}{10\,000} + 1.$$

On obtient donc l'échelle fictive en divisant tous les nombres du tiroir par 10 000 et en ajoutant 1 (fig. 19).

$$1,0001, \quad 1,0002, \quad 1,0003, \quad \dots \quad 1,001, \quad 1,002, \quad \dots \quad 1,01.$$

On trouve

$$y = 1,000485.$$

L'exemple précédent montre qu'il y a des cas où l'instrument peut donner dans le résultat une précision dont on ne le croirait pas capable, précision qui s'explique cependant par le fait que, grâce à l'arrangement apporté à l'échelle du tiroir, on a un instrument plus sensible.

Ainsi, supposons que dans notre cas je fasse dans la lecture de l'échelle du tiroir une erreur de 0,1 de division; que je lise, par exemple, 4,84 (valeur fictive

1,000 484). Alors l'origine du tiroir se trouverait à une place de l'échelle I, où je lis 1,001, nombre qu'on peut facilement évaluer. Or, la différence entre cette valeur et le nombre fictif est si grande que je suis obligé d'avancer le tiroir encore vers la gauche pour placer l'origine sur un nombre plus petit que 1,001. Mais entre 1,001 et 1 on ne peut plus évaluer de subdivisions. On mettra donc l'origine du tiroir sur le nombre 1 de l'échelle I, ce qui fait tomber le nombre marqué 4,85 exactement sur le nombre 4,85 du tiroir, dont la valeur fictive est 1,000 485. C'est à ce nombre qu'on doit s'arrêter, car le moindre mouvement du tiroir vers la gauche ferait passer son origine en dessous du nombre 1 de l'échelle I et donnerait une racine plus petite que l'unité, ce qui est contraire à la condition $10 > y > 1$. On obtient donc, dans ce cas, la valeur de la racine avec une erreur absolue plus petite que 0,000 001.

REMARQUE. — Si dans le calcul d'une racine, il fallait un nombre de décimales plus grand que l'instrument ne peut les fournir, on les obtiendrait par un calcul très simple.

Soit

$$\sqrt[n]{n} = r \pm \delta$$

$$r^n = n \mp \Delta,$$

r étant la racine trouvée au moyen de la règle à calcul, δ et Δ les erreurs respectives.

On aura

$$n = (r \pm \delta)^n = r^n \pm 3r^2 \delta + (3r\delta^2 \pm \delta^n);$$

δ étant un nombre très petit, on pourra négliger les termes qui contiennent les puissances de δ , et écrire

$$n = r^n \pm 3r^2 \delta;$$

substituant à r^3 sa valeur $n \mp \Delta$, il vient

$$n = n \mp \Delta \mp 3r^2\delta, \text{ d'où } \delta = \frac{\Delta}{3r^2},$$

c'est-à-dire, on divise la différence entre n et r^3 par $3r^2$, en faisant ces opérations au moyen du calcul ordinaire.

Par exemple :

$$\begin{aligned}\sqrt[3]{67\,932\,845} &= 408 \pm \delta; \\ 408^3 &= 67\,917\,312; \quad \Delta = 15\,533; \\ \delta &= \frac{15\,533}{499\,392} = 0,0311. \\ \therefore \sqrt[3]{n} &= 408,0311.\end{aligned}$$

En élevant ce nombre à la 3^e puissance, on trouve 67 932 844.

* * *

SECONDE PARTIE.

Tous les exemples cités jusqu'ici étaient des équations de la forme $x^3 \cdot x = R$, pour l'extraction de la racine cubique ou $y^3 (y \mp 1) = A$, pour les équations du 3^e degré proprement dites, dont nous avons calculé une seule racine.

Nous ne nous sommes pas occupé de calculer la racine x de la proposée $x^3 + px + q = 0$, ni d'examiner si l'équation a une ou plusieurs racines

M. Bour dit :

« Soit l'équation du 3^e degré sous la forme ordinaire

$$x^3 + px + q = 0.$$

» Mettant en évidence le signe de p , je distinguerai les
» deux équations

$$(1) \quad x^3 + px + q = 0$$

$$(2) \quad x^3 - px + q = 0$$

» le signe de q est indifférent.

» Faisons maintenant $x = -\frac{q}{py}$, $\frac{q^2}{p^3} = A$ (A étant essen-
» tiellement positif et les équations (1) et (2) deviennent
» respectivement

$$(3) \quad y^3 - y^2 = A$$

$$(4) \quad y^3 + y^2 = A''.$$

Mais si la méthode donne toujours une racine y avec son signe, qui est toujours positif, il n'en est pas de même quand on veut calculer la racine x de la proposée au moyen de la formule $x = -\frac{q}{py}$, laquelle donnerait toujours une racine x négative. Or, on sait que le signe de x dépend souvent du signe de q .

Exemple 17. — Prenons, par exemple, l'équation $x^3 + 3x - 140 = 0$, correspondant à l'équation transformée $y^3(y - 1) = A$.

$$A = \frac{q^2}{p^3} = \frac{140^2}{3^3} = 725,9. \quad (*)$$

Nous aurons donc à résoudre l'équation

$$y^3(y - 1) = 725,9.$$

(*) Voir pour le calcul de $\frac{q^2}{p^3}$ au moyen de la règle, la remarque p. 568.

On voit que $10 > y > 1$; pour remplir la seconde condition, divisons par 10, il vient

$$y^2 \cdot \frac{1}{10} (y - 1) = 72,59.$$

On marque 72,59, sur S on pose

$$\frac{1}{10} (y - 1) = z, \quad \text{d'où} \quad y = 10z + 1.$$

Il faut donc multiplier les nombres du tiroir par 10 et y ajouter 1. L'origine de l'échelle prenant la valeur fictive 11, il faut se servir de l'extrême. L'échelle fictive s'obtient par suite, en divisant les nombres de l'échelle T par 10 et en ajoutant 1.

On trouve $y = 9,33$ (fig. 21).

Substituant cette valeur dans l'équation donnée

$$x = -\frac{q}{p^2},$$

il vient

$$x = -\frac{140}{3,9,33} = -5.$$

Cependant, cette racine ne vérifie pas l'équation donnée dont la racine est

$$x = +5.$$

On obtiendra la racine de l'équation proposée, toujours avec son signe, en tenant compte, dans la formule $x = -\frac{q}{p^2}$ du signe de q , c'est-à-dire en se servant de la formule

$$x = -\frac{\pm q}{p^2}$$

En posant $x = -\frac{q}{p' y}$, la substitution ne conduit pas toujours à la transformée $q^3 \mp q^2 = A$.

I. — Posant $x = -\frac{q}{p' y}$, on a

$$1) \quad x^3 + p'x + q = 0$$

$$-\frac{q^3}{p'^3 y^3} - \frac{q}{y} + q = 0$$

$$-\frac{q^2}{p'^3 y^3} - \frac{1}{y} + 1 = 0$$

$$-q^2 - p'^3 y^2 + p'^3 y^3 = 0$$

$$y^3 - y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 - y^2 = A.$$

$$2) \quad x^3 + p'x - q = 0$$

$$-\frac{q^3}{p'^3 y^3} - \frac{q}{y} - q = 0$$

$$-\frac{q^2}{p'^3 y^3} - \frac{1}{y} - 1 = 0$$

$$-q^2 - p'^3 y^2 - p'^3 y^3 = 0$$

$$-y^3 - y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 + y^2 = -A.$$

$$3) \quad x^3 - p'x + q = 0$$

$$-\frac{q^3}{p'^3 y^3} + \frac{q}{y} + q = 0$$

$$-\frac{q^2}{p'^3 y^3} + \frac{1}{y} + 1 = 0$$

$$-q^2 + p'^3 y^2 + p'^3 y^3 = 0$$

$$y^3 + y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 + y^2 = A.$$

$$4) \quad x^3 - p'x - q = 0$$

$$-\frac{q^3}{p'^3 y^3} + \frac{q}{y} - q = 0$$

$$-\frac{q^2}{p'^3 y^3} + \frac{1}{y} - 1 = 0$$

$$-q^2 + p'^3 y^2 - p'^3 y^3 = 0$$

$$-y^3 + y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 - y^2 = -A.$$

II. — Posant $x = -\frac{\pm q}{p' y}$, on a

$$1) \quad x^3 + p'x + q = 0$$

$$-\frac{q^3}{p'^3 y^3} - \frac{q}{y} + q = 0$$

$$-\frac{q^2}{p'^3 y^3} - \frac{1}{y} + 1 = 0$$

$$-q^2 - p'^3 y^2 + p'^3 y^3 = 0$$

$$y^3 - y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 - y^2 = A.$$

$$2) \quad x^3 + p'x - q = 0$$

$$\frac{q^3}{p'^3 y^3} + \frac{q}{y} - q = 0$$

$$\frac{q^2}{p'^3 y^3} + \frac{1}{y} - 1 = 0$$

$$q^2 + p'^3 y^2 - p'^3 y^3 = 0$$

$$-y^3 + y^2 + \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 - y^2 - \frac{q^2}{p'^3} = 0$$

$$y^3 - y^2 = A.$$

$ \begin{aligned} 3) \quad x^5 - px + q &= 0 \\ -\frac{q^5}{p^5 y^5} + \frac{q}{y} + q &= 0 \\ -\frac{q^2}{p^5 y^5} + \frac{1}{y} + 1 &= 0 \\ -q^2 + p^5 y^2 + p^5 y^5 &= 0 \\ y^5 + y^2 - \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^5 + y^2 &= A. \end{aligned} $	$ \begin{aligned} 4) \quad x^5 - px - q &= 0 \\ \frac{q^5}{p^5 y^5} - \frac{q}{y} - q &= 0 \\ \frac{q^2}{p^5 y^5} - \frac{1}{y} - 1 &= 0 \\ q^2 - p^5 y^2 - p^5 y^5 &= 0 \\ -y^5 - y^2 + \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^5 + y^2 - \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^5 + y^2 &= A. \end{aligned} $
---	--

On voit donc que la substitution doit se faire par

$$x = -\frac{\pm q}{py},$$

p étant toujours positif.

On trouve donc $x = -\frac{140}{3 \cdot 9,33} = +5$.

Voyons maintenant de quelle manière on peut trouver toutes les racines réelles avec leurs signes (*).

A cet effet, il sera nécessaire de rappeler la discussion de l'équation du 3^e degré.

Étant donné l'équation sous sa forme ordinaire

$$x^3 + px + q = 0,$$

il y a trois hypothèses à distinguer :

- I. $\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} > 0$; l'équation a une racine réelle dont le signe est contraire à celui de q .

(*) La méthode de la règle à calcul étant essentiellement un procédé pratique, nous ne nous occuperons pas des racines imaginaires, pour lesquelles nous renvoyons au travail de M. Bour.

II. $\frac{q^2}{4} + \frac{p^5}{27} = 0$; l'équation a trois racines réelles ;
 une racine négative et deux positives égales, si q est positif, ou une racine positive et deux négatives égales, si q est négatif.

III. $\frac{q^2}{4} + \frac{p^5}{27} < 0$; l'équation à trois racines réelles

Puisque, dans la méthode de M. Bour, il faut toujours calculer le quotient $\frac{q^2}{p^5}$ ou A , on peut baser la classification des trois hypothèses sur la valeur numérique de A , en tenant compte du signe de p .

Dans les hypothèses II et III, p est nécessairement négatif.

Mais dans l'hypothèse I, il y a deux cas à distinguer selon que p est positif ou négatif.

Lorsque p est positif, l'équation appartient toujours à l'hypothèse I. Lorsque p est négatif, l'équation rentre, dans cette catégorie à la condition que $A > \frac{4}{27}$ ou $0,148148...$

D'après ceci, la discussion de l'équation peut se mettre sous la forme

$+p$ $-p$	
I _a	$A > 0,148... \text{ I}_b$
	$A = 0,148... \text{ II}$
	$A < 0,148... \text{ III}$

Le signe de p et la valeur numérique de A indiquent donc immédiatement dans laquelle des 3 catégories rentre l'équation.

Ainsi, l'équation de l'exemple 17 (p. 538) appartient au cas I, parce que p est positif. Elle a une seule racine réelle qui est positive, parce que $q = 140$ a le signe —.

Exemple 18. $x^3 + 3x + 140 = 0$ (cas I, parce que $p = 3$ est positif).

$$y^3 (y - 1) = A = \frac{140^2}{3^3} = 725,9.$$

On voit que $10 > y > 1$;
la seconde condition n'étant pas remplie, on divise par 10.

$$y^3 \cdot \frac{1}{10} (y - 1) = 72,59.$$

On marque 72,59 sur S, on pose $\frac{1}{10} (y - 1) = z$, d'où $y = 10z + 1$.

L'opération étant la même que celle de l'exemple 17, on obtient $y = 9,33$.

Au moyen de la formule $x = -\frac{\pm q}{p y}$ on obtient

$$x = -\frac{+140}{3,9,33} = -5.$$

p étant positif, l'équation appartient au cas I, c'est-à-dire elle n'a qu'une seule racine réelle qui est négative, parce que $q = 140$ est positif.

Exemple 19. $x^3 - 6x + 9 = 0$

$$y^3 (y + 1) = A = \frac{q^2}{p^3} = \frac{9^2}{6^3} = 0,375.$$

L'équation rentre dans le cas I, parce que p est négatif, mais $A = 0,375 > 0,148$. . . On sait d'avance que la racine x sera négative parce que $q = 9$ est positif.

On voit que $1 > y > 0,1$
il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = 0,1 y'$.

$y'^3 (y' + 10) = 375$. Divisant par 10, il vient

$$y'^3 \cdot \frac{1}{10} (y' + 10) = 37,5.$$

On marque 37,5 sur S, on pose $\frac{1}{10} (y' + 10) = z$, et on a $y' = 10z - 10$.

L'échelle fictive est obtenue en multipliant les nombres du tiroir par 10 et en retranchant 10

Par l'origine, on trouve $y' = 5$, d'où $y = 0,5$ (fig. 22).

Substituant cette valeur dans la formule $x = -\frac{\pm q}{py}$, on obtient

$$x = -\frac{+9}{6.0,5} = -3.$$

Exemple 20. $x^5 - 6x - 9 = 0$.

$y^2(y+1) = A = \frac{9^2}{6^3} = 0,375$ (cas I, car p est négatif et $0,375 = A > 0,148...$; la racine x sera positive, parce que q est négatif).

La dernière équation étant identique à la deuxième de l'exemple 19, on trouve

$$y = 0,5 \quad \text{d'où} \quad x = -\frac{\pm q}{py} = -\frac{-9}{6.0,5} = +3.$$

Exemple 21. $x^5 + 4,8x \pm 4 = 0$ (cas I, parce que p est positif).

$$y^2(y-1) = A = \frac{4^2}{4,8^3} = 0,1446.$$

On voit que $10 > y > 1$; la deuxième condition n'est pas remplie.

$$y^2 100 (y-1) = 14,46 \quad (*)$$

$$100 (y-1) = z : y = \frac{z}{100} + 1.$$

(*) Au lieu de multiplier les deux membres par 100, on pourrait aussi bien les multiplier par 10 et résoudre l'équation $y^2 10 (y-1) = 1,446$.

L'échelle fictive se forme en divisant les nombres de l'échelle T par 100 et en ajoutant 1. Par l'origine, on obtient $y = 1,116$ (fig. 23).

La racine de l'équation qui contient + 4, sera $x = -\frac{+4}{4,8,1,116} = -0,746$, celle de l'équation renfermant - 4, sera $x = -\frac{-4}{4,8,1,116} = +0,746$.

L'hypothèse II (p. 542) $\frac{q^2}{p^3} = A = 0,148148 \dots$ est un cas spécial qui sera traité page 550.

Le cas III a pour hypothèse $A < 0,148 \dots$. Il y a trois racines réelles.

Exemple 22. $x^3 - 7x + 5 = 0$.

(10) $y^3(y + 1) = A = 0,07288$ (cas III, parce que $A < 0,148 \dots$)

On voit que $1 > y > 0,1$;
il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = 0,1 y'$

$$y'^3(y' + 10) = 72,88.$$

On marque 72,88 sur S et on pose

$$y' + 10 = z, \text{ d'où } y' = z - 10. \quad (10_1)$$

L'échelle fictive s'obtient en retranchant 10 de tous les nombres du tiroir. Par l'origine on trouve $y' = 2,42$, d'où $y = 0,242$ (fig. 24).

Substituant cette valeur dans la formule $x = -\frac{\pm q}{p q}$, il vient

$$x = -\frac{+5}{7,0,242} = -2,951.$$

Par la discussion, on sait qu'il y a trois racines réelles. Nous allons donc chercher une racine positive

S'il y a une racine x positive, il faut que dans l'équation $x = -\frac{+q}{pq}$, y soit négative et que, par conséquent, l'équation (10) soit vérifiée en prenant y avec le signe $-$.

Nous aurons donc à résoudre l'équation

$$y^2(1 - y) = 0,07288 \quad (11)$$

on voit que $1 > y > 0,1$,

il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = 0,1 y' \quad (12)$

$$y'^2(10 - y') = 72,88.$$

On marque 72,88 sur S et on pose $10 - y' = z$, d'où $y' = 10 - z$. (11_b)

L'échelle fictive s'obtient en retranchant les nombres du tiroir de 10. Par l'origine, on trouve $y' = 3,295$ (fig. 25).

Donc $y = 0,3295$ et, d'après la supposition, la valeur de y doit entrer avec le signe $-$ dans la formule $x = -\frac{\pm q}{pq}$, on aura

$$x = -\frac{+5}{7(-0,3295)} = +2,167.$$

Pour voir s'il y a encore une racine positive, faisons glisser l'origine du tiroir, dont l'échelle fictive sera toujours celle déterminée par la formule (11_b), le long de l'échelle I. On ne trouvera pas d'autre valeur pour y . Mais on trouvera encore une valeur en se servant de l'extrême.

Dans ce cas, il faut se rappeler qu'on doit diviser les nombres de l'échelle T par 100 et puis appliquer la formule (11_b).

C'est-à-dire, on forme l'échelle fictive en divisant les nombres du tiroir par 100 et en retranchant ces valeurs de 10.

En cherchant avec cette échelle fictive, on trouvera par

son extrême le nombre 9,122 sur I, qui correspond au nombre 87,8 de l'échelle du tiroir dont la valeur fictive est $10 - \frac{87,8}{100} = 9,122$ (fig. 26).

De $y' = 9,122$ on tire $y = 0,9122$ (suivant l'équation (12), et cette valeur de y entre également avec le signe — dans la formule $x = -\frac{\pm q}{py}$, parce que y est une racine de l'équation (11).

On aura donc $x = -\frac{-15}{7(-0,9122)} = +0,783$.

Les trois racines de l'équation sont $x = \begin{cases} -2,951 (*) \\ +2,167 \\ +0,783 \end{cases}$

Exemple 23. $x^3 - 9x + 8 = 0$.

$$(13) \quad y^3(y+1) = A = \frac{8^2}{9^3} = 0,08779. \text{ (Cas III,}$$

parce que $0,08779 < 0,148$.)

On voit que $1 > y > 0,1$
il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = 0,1 y'$.

$$y'^3(y' + 10) = 87,79$$

$$y' + 10 = z, \text{ d'où } y' = z - 10. \quad (13_a)$$

L'échelle fictive est formée en retranchant 10 de tous les nombres du tiroir. Par l'origine, on trouve $y' = 2,635$ (fig. 27), d'où $y = 0,2635$ et

$$x = -\frac{-8}{9 \cdot 0,2635} = +3,373.$$

(*) On aurait pu se convaincre qu'après avoir trouvé la racine $y' = 2,42$ (p. 545), il n'y a pas d'autre valeur à trouver, ni par l'origine ni par l'extrême qui vérifie l'équation $y'^3(y' + 10) = 72,88$ (p. 545) et que, par suite, $x = -2,951$ était la seule racine négative.

Ni par l'origine, ni par l'extrême, on ne trouvera une autre valeur pour y' . Par conséquent, $x = + 3,373$ est la seule racine positive.

Pour chercher les racines négatives, on donne dans l'équation (13) à y le signe $-$, et on obtient

$$y^2 (1 - y) = 0,08779.$$

On voit que $1 > y > 0,1$;

il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = \frac{1}{10} y'$.

$$y'^2 (10 - y') = 87,79$$

$$10 - y' = z, \text{ d'où } y' = 10 - z. \quad (13_b)$$

L'échelle fictive se forme en retranchant les nombres du tiroir de 10. Au moyen de l'origine, on trouve $y' = 8,89$ (fig. 28), d'où $y = 0,889$

Cette valeur, d'après la supposition, entre avec le signe $-$ dans la formule $x = - \frac{\pm q}{p y}$, et on trouve

$$x = - \frac{-8}{9(-0,889)} = - 0,9999.$$

En déplaçant le tiroir vers la gauche, on trouve, au moyen de l'origine, encore une valeur de y' qui vérifie l'équation $y' = 3,75$ (fig. 29), d'où $y = 0,375$, également à prendre avec le signe $-$; $x = - \frac{-8}{9(-0,375)} = - 2,37$.

Les trois racines de la proposée sont $x = \begin{cases} + 3,373 \\ - 0,9999 \\ - 2,37. \end{cases}$

REMARQUE. — Après avoir trouvé la première racine dans les exemples 22 et 23, nous avons vu que, pour chercher les autres racines, il faut changer le signe de y

dans les équations (10) et (13), et nous avons finalement obtenu l'équation (11_b) respectivement (13_b), qui indiquent les opérations à faire pour former l'échelle fictive.

En comparant l'équation (10_a) avec (11_b) et (13_a) avec (13_b), on pourrait être porté à croire qu'il suffit de changer simplement les signes du second membre des équations (10_a) et (13_a) pour obtenir directement les équations (11_b) et (13_b). Il est facile de montrer que ce serait une erreur.

Reprenons l'exemple 22. L'équation (10) qui a fourni la racine négative est $y^2(y + 1) = 0,0728$; elle a conduit à l'équation (10_a) $y' = z - 10$ pour la formation de l'échelle fictive.

En changeant le signe de y pour chercher les deux autres racines, on avait obtenu l'équation (11) $y^2(1 - y) = 0,0728$, qui a conduit à l'équation (11_b) $y' = 10 - z$.

Or, si les valeurs de y dans les deux équations étaient toujours comprises entre les mêmes limites, on aurait les mêmes opérations à faire sur les deux équations pour les mettre dans les deux conditions nécessaires, et, dans ce cas, on pourrait passer immédiatement de l'équation (10_a) à (11_b) en changeant les signes du second membre de (10_a).

Mais les valeurs de y peuvent ne pas être comprises entre les mêmes limites comme l'exemple suivant le montrera.

$$\text{Soit } y^2(y + 1) = 0,00927.$$

On voit que $0,1 > y > 0,01$
et puisqu'il faut $10 > y' > 1$, on pose $y = 0,01 y'$.

On trouverait la première racine de y , avec son signe, par le procédé connu. Puis, pour trouver les autres racines avec leurs signes, car l'équation appartient au cas III ($0,00927 < 0,148...$ et p supposé négatif), on change le signe de y et on obtient $y^2(1 - y) = 0,00927$.

Ici on voit que $1 > y > 0,1$.

On voit donc que y , dans les deux cas, n'est pas compris entre les mêmes limites.

Dans le deuxième cas, il faut, pour avoir $10 > y' > 1$, poser $y = 0,1 y'$ et les opérations à faire pour arriver à l'équation de l'échelle fictive ne sont pas les mêmes.

C'est pourquoi il faut d'abord examiner si les valeurs de y dans les deux cas sont comprises entre les mêmes limites. Si cela a lieu, on peut passer immédiatement de l'équation (10_a) à (11_b), ce qui abrégera les opérations

Nous passons maintenant à l'examen du cas II.

Lorsque $\frac{q^3}{p^3} = 0,148148 \dots$ l'équation appartient au cas II (p. 24).

Exemple 24. $x^3 - 30x + 63,255 = 0$

$$y^3(y+1) = A = 0,148148 \dots \quad (14)$$

On sait qu'il y a trois racines réelles, dont une est négative, parce que 63,255 est positif, et deux positives égales.

On voit que $1 > y > 0,1$,

il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = \frac{1}{10} y'$

$$y'^3(y' + 10) = 148,1$$

$$y'^3 \frac{1}{10}(y' + 10) = 14,81$$

$$\frac{1}{10}(y' + 10) = z, \text{ d'où } y' = 10z - 10.$$

On forme l'échelle fictive en multipliant les nombres du tiroir par 10 et on retranche 10. Par l'origine, on trouve $y' = 3,333$ (fig 30), d'où

$$y = 0,3333 \text{ et } x = -\frac{\pm q}{p y} = -\frac{63,255}{30,0,3333} = -6,329.$$

Une autre racine négative n'existe pas d'après la discussion. Pour trouver la racine positive, on prend y avec le signe — dans l'équation (14).

$$y^2 (1 - y) = 0,148148. \dots$$

On voit que $1 > y > 0,1$,
il faut que $10 > y' > 1$, d'où $y = 0,1 y'$.

$$y'^2 (10 - y') = 148,14$$

$$y'^2 \frac{1}{10} (10 - y') = 14,81$$

$$\frac{1}{10} (10 - y') = z \quad \text{d'où} \quad y' = 10 - 10z.$$

Il faut donc multiplier les nombres du tiroir par 10 et les retrancher de 10. On remarquera que l'origine ne convient pas; il faut donc se servir de l'extrême, diviser d'abord le nombre du tiroir par 100 et les multiplier alors par 10, ou, ce qui revient au même, diviser directement par 10 et les retrancher de 10. On trouve $y' = 6,7$ (fig. 31). (*)

d'où $y = 0,67$, avec le signe —, suivant la supposition.

$$\text{Alors } x = -\frac{\pm q}{py} = -\frac{63,255}{30(-0,67)} = +3,14.$$

$$\text{Les trois racines de l'équation sont } x = \begin{cases} -6,329 \\ +3,14 \\ +3,14. \end{cases}$$

(*) En cherchant la racine $y' = 6,7$, on aura remarqué qu'il y a une grande incertitude dans le résultat. On trouve que la racine doit être comprise entre 0,65 et 0,68, mais il est impossible d'en déterminer la valeur exacte au moyen de la règle.

Comme cette incertitude ne se présente dans aucun des autres cas que nous avons considérés, il doit y avoir une particularité que nous allons montrer dans la suite. (Voir p. 555.)

Tout ce qui a été dit sur la discussion de l'équation $y^2 (y \mp 1) = A$ peut-être représenté graphiquement.

En considérant, dans l'équation $y^2 (y + 1) = A$, y comme variable indépendante, on peut lui attribuer différentes valeurs et calculer les valeurs correspondantes de la fonction A .

y	y^2	$y + 1$	$A =$ $y^2 (y + 1)$
1	1	2	2
0,9	0,81	1,9	1,539
0,8	0,64	1,8	1,152
0,7	0,49	1,7	0,833
0,6	0,36	1,6	0,576
0,5	0,25	1,5	0,375
0,4	0,16	1,4	0,224
0,3	0,09	1,3	0,117
0,2	0,04	1,2	0,048
0,1	0,01	1,1	0,011
0	0	1	0
— 0,1	0,01	0,9	0,009
— 0,2	0,04	0,8	0,032
— 0,3	0,09	0,7	0,063
— 0,4	0,16	0,6	0,096
— 0,5	0,25	0,5	0,125
— 0,6	0,36	0,4	0,144
— 0,7	0,49	0,3	0,147
— 0,8	0,64	0,2	0,128
— 0,9	0,81	0,1	0,081
— 1	1	0	0
— 2	4	— 1	— 4

Le tableau ci-dessus contient ces différentes valeurs de la variable et de la fonction.

On voit que, pour toutes les valeurs positives et croissantes de y , les valeurs de la fonction A sont positives et croissantes.

Pour $y = 0$, la fonction devient nulle.

En donnant à y des valeurs négatives et croissantes, la fonction A est d'abord positive et croît jusqu'à une valeur comprise entre 0,144 et 0,128, correspondant à une valeur de y comprise entre $-0,6$ et $-0,8$.

Puis la fonction, tout en restant positive, décroît jusqu'à zéro, tandis que la variable croît jusqu'à -1 .

A partir de $y = -1$, toutes les valeurs de la fonction sont négatives.

Afin de pouvoir construire la courbe, il faut calculer le maximum de la fonction, en différentiant $dy^3(y+1) = dA$ et en égalant la première dérivée à zéro. On obtient finalement $3y^2 + 2y = 0$, d'où $y = -\frac{2}{3} = -0,666 \dots$

Substituant cette valeur dans l'équation $y^3(y+1) = A$, il vient

$$\left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot \frac{1}{3} = A = \frac{4}{27} = 0,148148 \dots$$

La valeur maxima de la fonction est donc 0,148... et correspond à l'abscisse $y = -0,666 \dots = -\frac{2}{3}$.

Maintenant, on peut construire la courbe I (fig. 32), en portant les valeurs de y comme abscisses et celles de A comme ordonnées sur les axes.

Cette courbe est facile à interpréter pour la discussion de l'équation

$$y^3(y+1) = A.$$

A étant supposé toujours positif (p. 538), on voit que pour $A > 0,148 \dots$, c'est-à-dire, pour toute la partie de

la courbe positive au-dessus du point B, l'équation a une seule racine réelle qui est toujours positive (cas I_b, page 542).

Lorsque $A = 0,148$. . ce qui a lieu aux points B et C, il y a une racine positive (dont la valeur est $y = \frac{1}{3}$, comme il sera démontré plus bas) et deux racines négatives et égales à $-0,666$. . ou $-\frac{2}{3}$ (cas II, page 542). Pour toute valeur $A < 0,148$. ., situées sur la courbe BOCD, il y a une racine positive et deux négatives (cas III, p. 542).

Il reste encore à montrer que la racine positive de l'équation du cas II $y^2(y+1) = 0,148$. . est égal à $\frac{1}{3}$ (voir ci-dessus).

En désignant par $-y$ la racine négative qui correspond au maximum de la fonction, et par y_1 la racine positive correspondant à la même valeur de la fonction, on a

$$y^2(1-y) = A, \quad y_1^2(y_1+1) = A$$

$$y^2 - y^3 = y_1^3 + y_1^2$$

$$y^2 - y_1^2 = y_1^3 + y^3$$

$$(y+y_1)(y-y_1) = y_1^3 + y^3;$$

divisant les deux membres par $y+y_1$, il vient

$$y-y_1 = y^2 - yy_1 + y_1^2;$$

substituant à y sa valeur $\frac{2}{3}$, et ordonnant, il vient

$$y_1^2 + \frac{1}{3}y_1 = \frac{2}{9},$$

équation du second degré qui donne les deux valeurs

$$y_1 = -\frac{1}{6} \pm \frac{3}{6} \text{ ou } y_1 = \begin{cases} +\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{cases}.$$

On voit donc que les équations du cas II peuvent être résolues d'une manière générale au moyen de la transformée de M. Bour, sans la règle à calcul.

L'équation proposée étant

$$x^3 - px \pm q = 0, \text{ et } \frac{q^2}{p^3} = 0,148 \dots,$$

on n'a qu'à substituer dans la formule $x = -\frac{\pm q}{py}$ les valeurs

$$y = \begin{cases} +\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{cases}$$

pour obtenir les trois racines avec leurs signes.

De plus, le tableau page 552 et la courbe I donnent l'explication pour l'incertitude dans la détermination de la racine négative au moyen de la règle à calcul (p. 551, (*)).

C'est que, aux environs du maximum, les valeurs des ordonnées correspondant aux abscisses entre $y = -0,5$ et $y = -0,8$ diffèrent très peu les unes des autres, tandis que cette incertitude n'existe pas pour les ordonnées autour du point B de la courbe.

On peut calculer et construire la courbe $y^2(y-1) = A$ et on obtient le tableau ci-contre et une courbe qui ressemble à la courbe GBOCDI, mais dont le point B est

situé sur l'axe des y à une distance égale à $+1$ de l'origine O .

y	y^2	$y - 1$	$A = y^2(y - 1)$
2	4	1	4
1	1	0	0
0,9	0,81	— 0,1	— 0,081
0,8	0,64	— 0,2	— 0,128
0,7	0,49	— 0,3	— 0,147
0,6	0,36	— 0,4	— 0,144
0,5	0,25	— 0,5	— 0,125
0,4	0,16	— 0,6	— 0,096
0,3	0,09	— 0,7	— 0,063
0,2	0,04	— 0,8	— 0,032
0,1	0,01	— 0,9	— 0,009
0	0	— 1	0
— 0,1	0,01	— 1,1	— 0,011
— 0,2	0,04	— 1,2	— 0,048
— 0,3	0,09	— 1,3	— 0,117
— 0,4	0,16	— 1,4	— 0,224
— 0,5	0,25	— 1,5	— 0,375
— 0,6	0,36	— 1,6	— 0,576
— 0,7	0,49	— 1,7	— 0,833
— 0,8	0,64	— 1,8	— 1,152
— 0,9	0,81	— 1,9	— 1,539
— 1	1	— 2	— 2

La seule partie de cette courbe qui a rapport à la méthode est la branche positive correspondant à la partie BG de la figure et représentant la fonction A qui, par supposition, est toujours positive, mais qui peut avoir toutes les valeurs. Les abscisses de cette branche sont

toutes positives, ce qui montre que l'équation $y^2(y-1) = A$ n'a qu'une seule racine, qui est positive.

REMARQUE. — M. Bour a proposé les deux équations transformées $y^2(y-1) = A$, correspondant à l'équation $x^3 + px + q = 0$; $y^2(y+1) = A$, correspondant à $x^3 - px + q = 0$. Au point de vue de la méthode de la règle à calcul, ces équations ont l'avantage de renfermer A toujours avec le signe $+$.

Mais leur représentation graphique exige deux courbes différentes. Au point de vue de la théorie de l'équation du troisième degré, il est préférable d'avoir une seule courbe représentant tous les cas de l'équation.

A cet effet, on pose dans l'équation

$$x^3 \pm p x \pm q = 0$$

$$x = \frac{\pm q}{\pm p y}$$

et on obtient l'équation générale $y^2(y+1) = \mp A$, dans laquelle A sera négatif ou positif selon que p est positif ou négatif (voir le tableau p. 558). En attribuant à y toutes les valeurs de $+\infty$ jusqu'à $-\infty$, on obtient, d'après le tableau, p. 556, la courbe I, fig. 32, qui représente toute la discussion de l'équation du troisième degré.

On voit d'abord que pour A positif (GBOCD), il y a trois cas à distinguer :

I. $A > 0,148\dots$ (courbe GB), il y a une seule racine y , qui est positive.

II. $A = 0,148\dots$ (aux points B et C), une racine positive, $y = +\frac{1}{3}$ et deux racines négatives coïncidentes, $y = -\frac{2}{3}$.

III. $A < 0,148\dots$ (courbe BOCD), il y a trois racines dont une positive et deux négatives.

Enfin, lorsque A devient négatif (courbe DJ), il y a une seule racine qui est négative.

Dans la discussion ordinaire, ce cas est compris sous le cas I.

$$\begin{aligned} x &= \frac{q}{py} \\ 1) \quad x^5 + px + y &= 0 \\ \frac{q^5}{p^5 y^5} + \frac{q}{y} + q &= 0 \\ \frac{q^2}{p^5 y^5} + \frac{1}{y} + 1 &= 0 \\ q^2 + p^5 y^2 + p^5 y^5 &= 0 \\ y^5 + y^2 + \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^2 (y + 1) &= -A. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= -\frac{q}{py} \\ 3) \quad x^5 - px + q &= 0 \\ -\frac{q^5}{p^5 y^5} + \frac{q}{y} + q &= 0 \\ -\frac{q^2}{p^5 y^5} + \frac{1}{y} + 1 &= 0 \\ -q^2 + p^5 y^2 + p^5 y^5 &= 0 \\ y^5 + y^2 - \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^2 (y + 1) &= +A. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{-q}{py} \\ 2) \quad x^5 + px - q &= 0 \\ -\frac{q^5}{p^5 y^5} - \frac{q}{y} - q &= 0 \\ -\frac{q^2}{p^5 y^5} - \frac{1}{y} - 1 &= 0 \\ -q^2 - p^5 y^2 - p^5 y^5 &= 0 \\ -y^5 - y^2 - \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^2 (y + 1) &= -A. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{-q}{-py} \quad \text{ou} \\ x &= \frac{q}{py} \\ 4) \quad x^5 - px - q &= 0 \\ \frac{q^5}{p^5 y^5} - \frac{q}{y} - q &= 0 \\ \frac{q^2}{p^5 y^5} - \frac{1}{y} - 1 &= 0 \\ q^2 - p^5 y^2 - p^5 y^5 &= 0 \\ -y^5 - y^2 + \frac{q^2}{p^5} &= 0 \\ y^2 (y + 1) &= +A. \end{aligned}$$

en général, $y^2 (y + 1) = \mp A$.

Quant aux signes des racines correspondantes x de l'équation proposée, c'est la formule $x = \frac{\pm q}{\pm py}$ qui les détermine.

TROISIÈME PARTIE.

Dans tous les exemples précédents, nous avons supposé qu'un problème ait conduit à la forme de l'équation

$$x^3 + p x + q = 0.$$

Ce cas se rencontrera probablement très rarement.

Les formes ordinaires de l'équation du troisième degré sont

$$1) x^3 + P x^2 + Q x + R = 0$$

$$2) x^3 + P x^2 + R = 0 \quad (\text{p. 531}).$$

A la seule inspection de la forme 2, on trouve qu'elle ressemble beaucoup à l'équation transformée de M. Bour:

$$y^3 \mp y^2 = A.$$

En la mettant sous la forme

$x^2 (x + P) = R$, son analogie avec l'équation

$y^2 (y \mp 1) = A$ est évidente. Elle peut être résolue au moyen de la règle à calcul sans transformation préalable.

Si les deux conditions

$$1) 10 > x > 1$$

$$2) 100 > R > 1$$

n'existent pas, on les réalisera par les opérations connues.

Exemple 25. $x^2 (x - 44,61) = 13177.$

On voit que

$$100 > x > 10$$

il faut que

$$10 > y' > 1, \text{ donc } x = 10 y'$$

$$y'^2 (y' - 4,461) = 13,177. \quad (15)$$

On marque 13,18 sur S et on pose

$$y' - 4,461 = z, \text{ d'où } y' = z + 4,461.$$

L'échelle fictive se forme en ajoutant 4,461 aux nombres du tiroir et on voit de suite que l'origine ne peut pas servir (p. 525).

En se servant de l'extrême, il faut d'abord diviser tous les nombres de l'échelle T par 100 et puis ajouter 4,461. On obtient donc

$$\begin{array}{ccccccc} 0,01 & 0,02 & \dots & 0,1 & 0,2 & \dots & 1, \\ + 4,461 & + 4,461 & & + 4,461 & + 4,461 & & + 4,461 \\ \hline 4,471 & 4,481 & \dots & 4,561 & 4,661 & \dots & 5,461 \end{array}$$

C'est cette dernière série de nombres qui constitue l'échelle fictive.

On trouve bientôt que la racine est voisine de 5 ; car en plaçant le nombre 0,5 du tiroir (valeur fictive $0,5 + 4,461 = 4,961$) en regard de 13,18, l'extrême tombe sur un nombre $m > 5$ sur I (fig. 33).

En prenant 0,6 du tiroir (valeur fictive $0,6 + 4,461 = 5,061$), l'extrême tombe sur un nombre $n < 5$ de l'échelle I (fig. 34).

Maintenant, pour plus de facilité, on forme sur le papier l'échelle fictive entre ces deux limites.

$$\begin{array}{ccc} 0,5 & 0,51 & 0,52 \dots \\ + 4,461 & + 4,461 & + 4,461 \\ \hline 4,961 & 4,971 & 4,981 \dots \end{array}$$

En plaçant 0,52, (valeur fictive 4,981) sur 13,18, l'extrême tombe sur l'échelle I sur 5,04 (fig. 35) ; en prenant 0,53 (valeur fictive 4,991), l'extrême tombe sur 4,99 (fig. 36).

Il y a donc accord entre le nombre de l'échelle fictive et le nombre de l'échelle I.

Ainsi, la racine est

$$y' = 4,99 \text{ et } x = 10 y' = 49,9.$$

Si l'on voulait savoir si l'équation a encore d'autres racines réelles, on chercherait d'abord avec la même échelle fictive et on trouverait qu'aucune position du tiroir ne donne un second résultat, d'où l'on conclurait que l'équation n'a pas d'autre racine positive.

Pour voir s'il y a des racines négatives, on n'a qu'à donner, dans l'équation (15), ou même dans l'équation initiale, le signe — à y' , respectivement à x , et on obtiendrait l'équation $y'^2 (-y' - 4,461) = 13,18$, respectivement $x^2 (-x - 44,61) = 13177$ qui ne peut-être vérifiée par aucune valeur réelle de y' ou de x .

Par conséquent, $x = 49,9$ est la seule racine réelle de l'équation. C'est d'ailleurs la nature du problème qu'on a mis en équation qui, en pratique, renseignera sur le nombre des racines.

Ainsi l'équation que nous venons de résoudre se présente dans le calcul des tensions des fils conducteurs ; c'est la tension cherchée en kilogrammes à — 10° d'un fil télégraphique en bronze phosphoreux de 2 millimètres de diamètre qui a été posé à + 18° sous une tension de 38 kilos, ayant une portée de 100 mètres.

L'équation qui vient d'être résolue ayant un intérêt général dans le calcul des tensions des fils conducteurs, je donne ci-dessous la mise en équation détaillée, en renvoyant d'ailleurs au travail mentionné à la page 517 (*)

Un fil posé à la température de 18° sous une tension

normale de T^k , aura à une autre température une tension T' liée à la valeur de T par l'équation

$$T'^3 + T'^2 \left(\frac{m - a - me' T}{me'} \right) = \frac{i}{24 me'} \quad (\text{p. 6 du travail cité}).$$

Les autres grandeurs contenues dans cette équation sont liées aux différentes constantes et variables par les équations suivantes :

$$m = l (1 - \alpha t) \quad (\text{p. 6 du travail cité})$$

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24 l^2} \quad (\text{p. 5 du } \gg \gg)$$

$$e' = \frac{c}{S} \quad (\text{p. 4 du } \gg \gg)$$

$$i = a^3 p^2 \quad (\text{p. 6 du } \gg \gg)$$

en désignant

par a la portée en mètres,

» t la différence entre la température normale de 18° et la température pour laquelle on veut calculer la tension (p. 10 du travail cité),

» α le coefficient de dilatation linéaire du métal,

» p le poids du fil en kilogrammes par mètre,

» T la tension normale à 18° ,

» c le coefficient élastique du métal (travail cité p. 8),

» S la section du fil.

Pour les fils en bronze phosphoreux, on a les constantes

$$\alpha = 0,00001655 \quad (\text{p. 8 du travail cité})$$

$$c = 0,000078 \quad (\text{p. 9 du } \gg \gg).$$

Le poids de 1 mètre des différents fils usuels, ainsi que la tension normale T à 18° se trouvent indiqués en tête des tableaux dans le travail en question.

Ainsi, pour l'exemple n° 25, on a les valeurs numériques

$$a = 100$$

$$t = 18 - (-10) = 28$$

$$p = 0,028 \text{ (p. 19 du travail cité)}$$

$$T = 36$$

$$S = 3,14.$$

L'exemple suivant fait voir que la méthode est aussi applicable à une équation qui contient A avec le signe —.

Exemple 26. $x^2(x - 5) = -58.$

On voit qu'aucune valeur positive de x ne peut vérifier l'équation.

Posons $x = -y.$

$$y^2(-y - 5) = -58$$

ou

$$y^2(y + 5) = 58.$$

On voit que $10 > y > 1$, les deux conditions sont remplies.

$$y + 5 = z, \text{ d'où } y = z - 5.$$

L'échelle fictive est obtenue en retranchant 5 de tous les nombres du tiroir, et on trouve par l'origine

$$y = 2,736 \text{ d'où } x = -2,736. \quad (\text{fig. 37}).$$

Exemple 27. — Un ballon de forme sphérique doit être en équilibre sous une charge P; quel doit être son rayon r , si p est le poids de 1 m^3 de l'enveloppe, a le poids de 1 m^3 d'air, g le poids de 1 m^3 de gaz ?

Appelant V le volume de la sphère,

S sa surface,

le ballon sera en équilibre lorsque

$$Vg + Sp + P - Va = 0;$$

$$V(g - a) + Sp + P = 0.$$

Exprimant V et S par le rayon r , il vient

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (g - a) + 4 \pi r^2 p + P = 0$$

$$r^3 + r^2 \frac{3p}{g-a} = -\frac{3p}{4(g-a)}.$$

Voilà un problème qui conduit immédiatement à la forme de l'équation $x^3(x + P) = x$ et qu'on peut résoudre au moyen de la règle à calcul sans transformation préalable.

Exemple 28. — Une sphère solide en fer du rayon r flotte sur du mercure ; on demande la profondeur h à laquelle elle plongera.

Appelant V le volume de la sphère,

δ sa densité,

v le volume du mercure déplacé,

δ' la densité du mercure,

l'équilibre sera établi, lorsque

$$V\delta - v\delta' = 0$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \delta - \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \delta' = 0$$

$$h^3 - h^2 \cdot 3r + 4r^3 \frac{\delta}{\delta'} = 0$$

$$h^3 (h - 3r) = -4r^3 \frac{\delta}{\delta'}$$

Lorsque $r = 5$ cm, $\delta = 7,7$, $\delta' = 13,6$, on a $h^2(1-15) = 283$
On voit qu'une valeur positive de h , comprise entre 10 et

1 peut vérifier l'équation, la première condition est donc remplie ; la seconde ne l'étant pas, on divise les deux membres par 10

$$h^2 \frac{1}{10} (h - 15) = -28,3$$

$$h^2 \frac{1}{10} (15 - h) = 28,3.$$

On marque 28,3 sur S, on pose

$$\frac{1}{10} (15 - h) = z, \text{ d'où } h = 15 - 10z. \quad (16)$$

Il faut donc multiplier les nombres du tiroir par 10 et retrancher ces produits de 15.

L'origine ne pouvant pas servir, on opère par l'extrême après avoir divisé tous les nombres du tiroir par 100 et en appliquant alors la formule (16), en d'autres termes, l'échelle fictive se forme définitivement en divisant les nombres du tiroir par 10 et en les retranchant de 15.

On trouve $h = 5,45$ cm (fig. 38).

* * *

QUATRIÈME PARTIE

Un grand nombre de problèmes conduit à la forme de l'équation

$$(17) \quad x^5 \pm Px^2 \pm Qx \pm R = 0,$$

laquelle doit être transformée pour appliquer la méthode de la règle à calcul.

Si l'on veut employer l'équation transformée de M. Bour,

$$(18) \quad y^2 (y \mp 1) = A,$$

on doit partir de la forme

$$(19) \quad x^3 \pm px \pm q = 0.$$

La transformation à effectuer sur l'équation (17), pour faire disparaître le terme à la deuxième puissance et pour obtenir ainsi la forme (19), consiste, comme on sait, dans la substitution à l'inconnue x d'une nouvelle inconnue x' , liée à la première par l'équation

$$x = x' - \frac{\pm P}{3}.$$

La transformation finale s'obtient directement de l'équation (17) en substituant les quantités connues de celle-ci dans l'équation

$$x'^3 + x' \left(\pm Q - \frac{P^2}{3} \right) + \left[2 \left(\frac{\pm P}{3} \right)^3 - \left(\frac{\pm P}{3} \right) \left(\pm Q \right) \pm R \right] = 0.$$

Ayant calculé les quantités numériques des différents termes, on a l'équation

$$x'^3 \pm px' \pm q = 0$$

et puis

$$y^2(y \mp 1) = A = \frac{q^2}{p^3}.$$

De la valeur y , obtenue au moyen de la règle à calcul, on tire celle de x' au moyen de la formule

$$x' = - \frac{\pm q}{py}$$

et finalement on trouve la racine cherchée en posant

$$x = x' - \frac{\pm P}{3}.$$

Comme on vient de le voir, on est obligé de faire deux transformations d'équations pour arriver à l'équation $y^3 (y \mp 1) = A$ et deux autres transformations pour remonter, du résultat trouvé par la règle à calcul, jusqu'à la racine cherchée x .

En se servant de l'équation $x'^3 (x' \pm p) = q$, on n'a qu'une seule transformation de la proposée à faire et seulement une transformaton du résultat donné par l'instrument pour obtenir la racine cherchée x .

A cet effet, étant donné l'équation

$$(17) \quad x^3 \pm Px^2 \pm Qx \pm R = 0.$$

On peut se servir de la formule suivante :

$$x'^3 + x'^2 \frac{9[3(\pm Q) - P^2]}{2(\pm P)^3 - 9(\pm P)(\pm Q) + 27(\pm R)} + \frac{27}{2(\pm P)^3 - 9(\pm P)(\pm Q) + 27(\pm R)} = 0.$$

Après avoir calculé les termes numériques au moyen des quantités connues de l'équation (17), on peut directement résoudre l'équation

$$x'^3 (x' \pm p) = q$$

au moyen de la règle à calcul.

La racine cherchée s'obtient au moyen de la formule

$$x = \frac{1}{x'} - \frac{\pm P}{3}.$$

Remarque sur les transformations de l'équation du 3^e degré.

A l'exception du seul cas $x^3 \pm px^2 + q = 0$, qui peut être directement résolu par la méthode de la règle à calcul, on est toujours obligé de transformer l'équation donnée. Nous croyons donc bien faire de rappeler en quelques mots les principes de ces transformations.

Étant donné l'équation

$$(17) \quad x^3 + Px^2 + Qx + R = 0,$$

on peut demander à faire disparaître le terme en x^2 , soit pour l'application de la méthode de M. Bour, soit pour la résolution ordinaire au moyen de la formule de Cardan, ou bien le terme en x pour la méthode de la page 559.

En posant $x = x' + u$, et en substituant x par cette valeur dans l'équation (17), on obtient

$$x'^3 + x'^2(3u + P) + x'(3u^2 + 2Pu + Q) + u^3 + Pu^2 + Qu + R = 0. \quad (20)$$

Pour faire évanouir le terme en x'^2 , on pose $3u + P = 0$,

$$\text{d'où} \quad u = -\frac{P}{3} \text{ et } x = x' - \frac{P}{3}.$$

C'est au moyen de cette substitution qu'on obtient la formule p. 566, pour la méthode de M. Bour.

Si l'on veut, pour l'application de la méthode p. 559, supprimer le terme en x , on peut égaler à zéro le polynôme dérivé.

$$3u^2 + 2Pu + Q = 0$$

et calculer u en résolvant cette équation du 2^e degré. On trouverait

$$u = \frac{1}{3} \left(-P \pm \sqrt{P^2 - 3Q} \right)$$

d'où

$$x = x' + \frac{1}{3} \left(-P \pm \sqrt{P^2 - 3Q} \right).$$

Cette valeur de x substituée dans l'équation (17) fera disparaître le terme en x .

Il arrive cependant des cas, où la valeur de u devient imaginaire. Par exemple, soit l'équation

$$x^3 - 3x^2 + 7x - 40 = 0,$$

dont la racine est 3,866.

Si l'on voulait, pour la suppression du terme en x , calculer u , on aurait à résoudre l'équation

$$3u^2 - 6u + 7 = 0,$$

qui donnerait la valeur imaginaire

$$u = 1 \pm \sqrt{1 - 2,33}.$$

C'est pour éviter un calcul inutile que nous avons proposé l'équation transformée de la page 566, qui s'obtient par la substitution de la valeur

$$x = \frac{1}{x'} - \frac{P}{3}$$

dans l'équation (17).

Voici un exemple des deux modes de transformation :

Exemple 29. $x^3 - 3x^2 + 7x - 40 = 0.$

I. — D'après la formule, p. 566, on obtient

$$\begin{aligned} & x'^3 + x' \left(+7 - \frac{9}{3} \right) \\ & + \left[2 \left(\frac{-3}{3} \right)^2 - \left(\frac{-3}{3} \right) \left(+7 \right) - 40 \right] = 0. \end{aligned}$$

ou

$$x'^3 + 4x' - 35 = 0$$

$$y^3(y - 1) = A = \frac{35^3}{4^3} = 19,14.$$

On voit que $10 > y > 1$ et $100 > 19,14 > 1$.

$$y - 1 = z, \text{ d'où } y = z + 1.$$

On marque 19,14 sur S, et l'on forme l'échelle fictive en ajoutant 1 aux nombres du tiroir.

Par l'origine on trouve

$$y = 3,053 \text{ (fig. 39),}$$

et d'après la formule

$$x' = -\frac{\pm q}{py},$$

on obtient

$$x' = -\frac{-35}{4 \cdot 3,053} = +2,866$$

et comme

$$x = x' - \frac{\pm P}{3},$$

on a finalement

$$x = 2,866 + 1 = 3,866.$$

II. — D'après la formule, p. 567, on aurait

$$\begin{aligned} x'^3 + x'^2 \frac{9[3(+7) - 3^2]}{2(-3)^3 - 9(-3)(+7) + 27(-40)} \\ + \frac{27}{\text{même dénominateur}} = 0 \end{aligned}$$

ou

$$x'^3 + x'^2 \frac{108}{-945} + \frac{27}{-945} = 0$$

$$x'^3 - 0,1143 x'^2 = 0,02857$$

$$x'^2 (x' - 0,1143) = 0,02857$$

Or, voit que

$$1 > x' > 0,1,$$

il faut que

$$10 > y' > 1' \quad \text{d'où} \quad x' = \frac{1}{10} y'.$$

$$y'^2 (y' - 1,143) = 28,57$$

$$y' - 1,143 = z, \quad \text{d'où} \quad y' = z + 1,143.$$

On forme l'échelle fictive en ajoutant 1,143 aux nombres du tiroir, et par l'origine on trouve

$$y' = 3,488 \quad (\text{fig. 40}).$$

$$x' = 0,3488$$

$$x = \frac{1}{x'} - \frac{\pm P}{3} = \frac{1}{0,3488} + \frac{3}{3} = 3,866.$$

Finalement nous allons appliquer les deux méthodes à la résolution d'une équation numérique qui se présente dans le calcul des transformateurs électriques (*).

Exemple 30. $x^3 + 16,666 \dots x^2 - 2425,9x - 181979,7 = 0.$

La formule p. 566 donne

$$\begin{aligned} & x'^3 + x' \left(-2425,9 - \frac{16,66^2}{3} \right) \\ & + \left[2 \left(\frac{+16,66}{3} \right)^3 - \left(\frac{+16,66}{3} \right) \left(-2425,9 \right) - 181979,7 \right] = 0 \\ & x'^3 - 2518,4 x' - 168161 = 0. \\ & y^2 (y + 1) = A = \frac{168161^2}{2518,4^3} = 1,7704. \end{aligned}$$

(*) *Leçons sur l'électricité et ses applications industrielles*, par Eric Gérard.

On voit que

$$1 > y > 0,1$$

il faut que

$$10 > y' > 1, \text{ d'où } y = \frac{1}{10} y'$$

$$y'^2 (y' + 10) = 1770,4.$$

$$y'^2 \frac{1}{100} (y' + 10) = 17,7$$

$$\frac{1}{100} (y' + 10) = z. \text{ d'où } y' = 100z - 10.$$

En multipliant les nombres du tiroir par 100 et en retranchant 10, on remarquera de suite que l'origine ne peut pas servir.

En opérant par l'extrême, il faut diviser d'abord les nombres du tiroir par 100, et puisqu'alors il faut les multiplier par 100, ils gardent leur valeur ordinaire, dont il faut retrancher 10 pour obtenir l'échelle fictive.

On trouve

$$y' = 9 \text{ } 52 \text{ (fig. 41)}$$

$$y = 0,952$$

$$x' = - \frac{\pm q}{p y} = - \frac{- 168161}{2518,4 \cdot 0,952} = 70,14$$

$$x = x' - \frac{\pm P}{3} = 70 \text{ } 14 - \frac{+ 16,66}{3} = 64 \text{ } 59.$$

En employant la formule p. 567, on aurait

$$x'^5 + x'^2 \frac{9 [3(-2425,9) - 16,66^2]}{2 (+16,66)^5 - 9(+16,66)(-2425,9) + 27(-181979,7)} \\ + \frac{27}{\text{même dénominateur}} = 0$$

$$x'^5 + 0,1497 x'^2 - 0,000005946 = 0$$

$$x'^2 (x' + 0,1497) = 0,000005946.$$

On voit que

$$0,1 > x' > 0,01$$

il faut que

$$10 > y' > 1, \text{ d'où } x' = 0,01 y'$$

$$y'^2 (y' + 1,497) = 5,946.$$

$$y' + 1,497 = z, \text{ d'où } y' = z - 1,497.$$

On forme l'échelle fictive en retranchant 1,497 des nombres du tiroir, et par l'origine on trouve $y' = 1,426$ (fig. 42).

$$x' = 0,01 y' = 0,01426$$

$$x = \frac{1}{x'} - \frac{+P}{3} = \frac{1}{0,01426} - \frac{16,66}{3} = 64,57.$$

REMARQUE. —

Voir p. 538) (*).

Le quotient $A = \frac{q^2}{p^5}$ est facile à obtenir directement au moyen de la règle à calcul en posant $\frac{q^2}{p^5} = \frac{q^2}{p^2} \cdot \frac{1}{p}$.

A cet effet, on se sert de l'échelle inférieure T' du tiroir, laquelle contient les mêmes divisions que l'échelle I (fig. 43).

D'après ce qui a été dit p. 3 et 4 sur la disposition des échelles, on trouve le quotient $\frac{q^2}{p^2}$ en marquant q sur I (fig. 44), en mettant le nombre p lu sur T', en coïncidence avec q et en lisant sur S le nombre qui est indiqué par l'origine du tiroir.

On a sur la figure

$$l = l'' - l'$$

ou

$$L \log r = 2 L \log q - 2 L \log p$$

ou

$$r = \frac{q^2}{p^2}.$$

Puis on place le curseur sur r , et en mettant en coïncidence avec r le nombre p lu sur l'échelle supérieure T du tiroir, on lit sur S le nombre A marqué par l'origine du tiroir (fig. 45).

Car

$$l^{\text{III}} = l^{\text{IV}} - l^{\text{V}}$$

ou

$$L \log A = L \log r - L \log p$$

ou

$$A = \frac{r}{p} = \frac{q^2}{p^2}.$$

Il faut se rappeler que chaque fois qu'un résultat est obtenu par l'extrême du tiroir, la valeur d'une des échelles change.

Supposons que dans la fig 46, q et p soient les nombres dont on veut obtenir le rapport des carrés, et voyons quelle est la valeur qu'il faut attribuer au nombre r , marqué par l'extrême, pour obtenir $\frac{q^2}{p^2}$.

On a

$$l^{\text{II}} + l^{\text{I}} = l$$

ou

$$2 L \log q + (2 L \log 10 - 2 L \log p) = L \log r$$

ou

$$\frac{q^2}{p^2} \frac{100}{p^2} = r$$

ou

$$\frac{q^2}{p^2} = \frac{r}{100}.$$

De là, on conclut que. pour obtenir le quotient $\frac{q^2}{p^2}$ par l'extrême, il faut diviser le nombre indiqué sur S par 100.

Puis si l'on trouvait encore le quotient $\frac{r}{q} = A$ par l'extrême, on aurait

$$l^{iv} + l^v = l^{iii} \quad (\text{fig. 47})$$

ou

$$L \log r + (2 L \log 10 - L \log p) = L \log A$$

ou

$$\frac{r}{p} \frac{100}{100} = A,$$

donc

$$\frac{r}{p} = \frac{A}{100}.$$

Il faudrait donc diviser le nombre A par 100.

$$\text{Par exemple : } A = \frac{140^2}{3^5}.$$

Puisque sur l'échelle T' et I il n'y a que les nombres de 1 à 10, il faut décomposer convenablement le quotient A .

$$A = \frac{140^2}{3^5} = \frac{1,4^2}{3^2} \cdot 10\,000 \cdot \frac{1}{3} = r \cdot 10\,000 \cdot \frac{1}{3}.$$

On trouve $\frac{1,4^2}{3^2}$ au moyen de l'extrême de l'échelle T' (fig. 48), ce qui introduit le diviseur 100 dans le calcul. Cette division peut être immédiatement effectuée sur le multiplicateur 10 000 en supprimant 2 zéros. Il reste à calculer $A = \frac{r}{3} \cdot 100$.

La seconde division $\frac{r}{3}$ se faisant par l'origine de l'échelle T (fig. 49), donne 7.26, nombre qu'il faut multiplier par 100 pour obtenir le résultat définitif 726.

Ce nombre obtenu au moyen de la règle à calcul, sera

aussi exact que possible, car un nombre trouvé par le calcul ordinaire et contenant un plus grand nombre de chiffres, ne saurait pas être évalué sur l'échelle de l'instrument.

En terminant ce travail un peu long, qui rendra, nous l'espérons, service aux électriciens, dont la règle à calcul est un si utile auxiliaire, nous tenons à remercier Monsieur Montefiore Levi, sénateur, pour les précieux conseils et encouragements qu'il a bien voulu nous donner.

Nous lui en sommes infiniment reconnaissant

ERRATA AUX PLANCHES.



PLANCHE I.

FIG. 18. — En dessous du nombre 1,305 mettez 1,405.

PLANCHE II.

FIG. 32. — Au lieu de y , lisez A et marquez l'axe horizontal par y .

FIG. 33. — Au lieu de 10,65, lisez 13,18.

» » 0,4 0,5 » 0,5 au point où la pointillée coupe le trait représentant le tiroir.

FIG. 34. — » » 10,65 » 13,18 » »

» » 0,4 0,5 » 0,6 » »

FIG. 35. — » » 10,65 » 13,18 » »

» » 0,41 » 0,52 » »

» » 0,055 » 4,981 » »

» » 5,1 » 5,04 » »

FIG. 36. — » » 10,65 » 13,18 » »

» » 0,42 » 0,53 » »

» » 5,065 » 4,991 » »

» » 5,04 » 4,99 » »

FIG. 38. — » » 9,5 » 9,55 » »

» » 5,5 » 5,45 » »

» » 5,5 » 5,45 » »

Fig. 46. — Au bout de la longueur l , mettez r .

CHRONIQUE.



Nécrologie. — Nous apprenons tardivement la mort, bien inopinée, de notre camarade CARL VON HAHN. Après de brillantes études de droit à l'Université de Heidelberg, C. von Hahn, séduit par le prodigieux développement des applications de l'électricité, vint en 1892 à Liège, où il suivit avec succès les cours de l'Institut Montefiore. Appelé à un avenir des plus brillants, grâce à l'étendue de ses connaissances, à son intelligence ouverte et à son ardeur au travail, notre camarade a succombé en pleine jeunesse sans pouvoir réaliser les espérances que ses maîtres et ses amis avaient fondées sur lui.



Planche I

degré, au moyen de la règle à calcul.

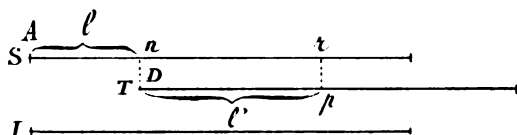
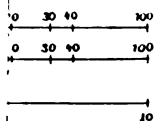


Fig: 4

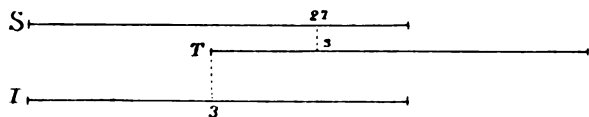


Fig: 7

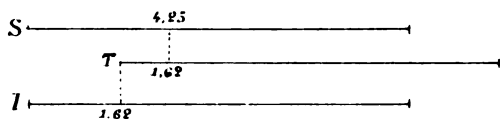
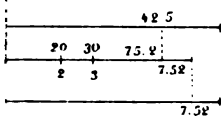


Fig: 11

Fig: 10

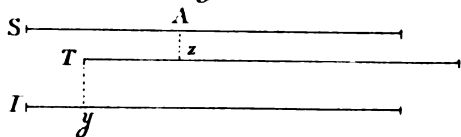


Fig: 14

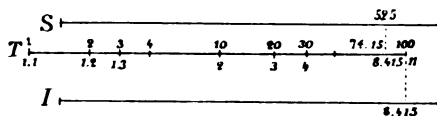


Fig: 17

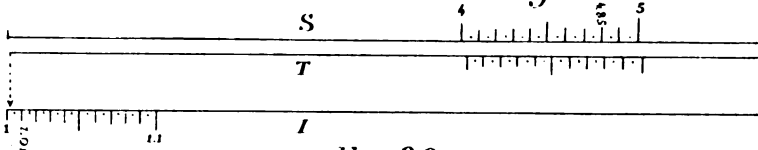


Fig: 20

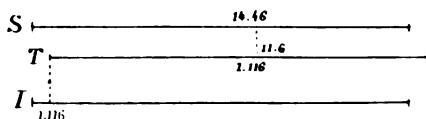


Fig: 23

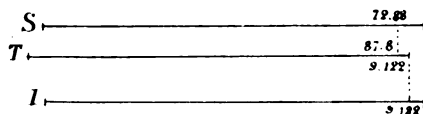


Fig: 26

Planche II

degré, au moyen de la règle à calcul.

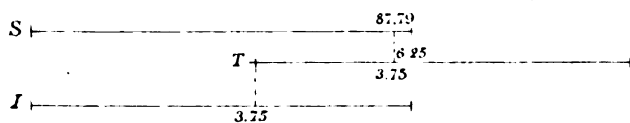


Fig. 29

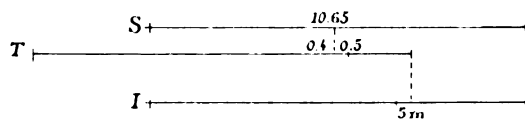


Fig. 33

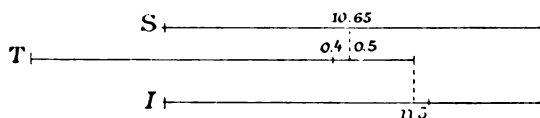


Fig. 34

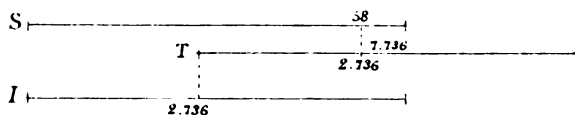


Fig. 37

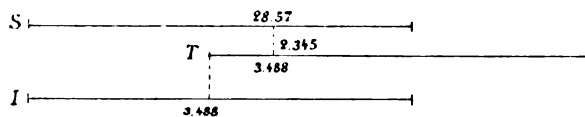


Fig. 40

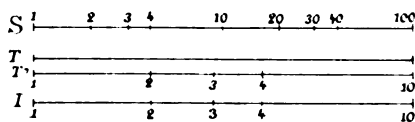


Fig. 43

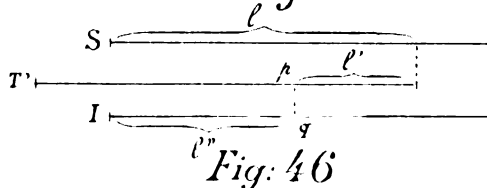


Fig. 46

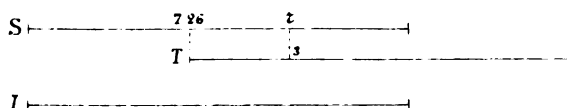


Fig. 49

TABLE DES MATIÈRES



Partie administrative.

	Pages.
Liste des membres de l'Association	3
Situation financière de la Société	35
Rapport annuel du Secrétaire Général	75
Nomination des Secrétaires-adjoints	95
Nomination d'un membre honoraire (M. Gramme)	235
Élection d'un 8 ^{me} Commissaire	93
Élection du Président pour 1898-1899	470
Élection du Secrétaire Général et du Trésorier pour 1898-1901	516
Élection des Commissaires pour 1898-1899	516
Procès-verbal de la séance du 28 novembre 1897	35
Procès-verbal de la séance du 12 décembre 1897	58
Procès-verbal de la séance du 30 janvier 1898	95
Procès-verbal de la séance du 27 février 1898	161
Procès-verbal de la séance du 27 mars 1898	235
Procès-verbal de la séance du 24 avril 1898	287
Procès-verbal de la séance du 29 mai 1898	309
Procès-verbal de la séance du 19 juin 1898	413
Procès-verbal de la séance du 26 juin 1898	464
Procès-verbal de la séance du 28 août 1898	477
Procès-verbal de la séance du 30 octobre 1898	516

Communications techniques et scientifiques.

Mémoires.

Cloeren. — Méthode Cloeren-Bour pour la résolution générale des équations du 3 ^e degré au moyen de la règle à calcul	517
Colard. — Étude mathématique du système anti-inducteur Van Rysselberghe sur les courtes lignes	477
Colard. — L'intensité du courant téléphonique reçu dans le système Van Rysselberghe de télégraphie et de téléphonie simultanées	496

De Bast. — Éléments du calcul des générateurs électriques à courants alternatifs (<i>suite</i>)	58
Della Riccia. — Les ondes électromagnétiques et la télégraphie sans fil	96-161
Della Riccia. -- Étude graphique de la machine à courant continu excitée en dérivation	413
Del Proposto. — Phénomènes électrolytiques. (Discours inaugural du Président)	36
Del Proposto. — Le réglage de la tension dans les distributions à trois fils à courant continu	287
de Waal. — Les accumulateurs à poste fixe dans les usines de force	235
Hefter. — La soudure électrique en Russie	246
L'Hoest. — Procédé graphique pour la détermination des éclaircissements	464
Rutten. — Le régulateur astatique à valve équilibrée, système Pilet	79
Van der Wallen. — La traction mécanique et électrique des bateaux sur les canaux.	309

Divers

Séance d'inauguration du local, 26 février 1898	157
Manifestation de l'Association en l'honneur de M. le Sénateur Montefiore	407
Commission consultative pour l'application de l'électricité aux travaux des mines et carrières	231
Examens de sortie de l'Institut Montefiore	471
Nécrologie. — Charles Van Kesteren	232
John Hopkinson.	475
Carl Von Hahn	578

